

Analyse von 3D-Visualisierungen durch die
Kombination von interaktiven Oberflächen mit
Augmented Reality Head-Mounted Displays

Maximilian Gräf

April 23, 2018

Technische Universität Dresden



Fakultät Informatik
Institut für Software- und Multimediatechnik
Professur für Multimedia-Technologie

Master-Thesis

**Analyse von 3D-Visualisierungen durch die
Kombination von interaktiven Oberflächen mit
Augmented Reality Head-Mounted Displays**

eingereicht von: Maximilian Gräf (Matr. Nr.: 3858812)

E-Mail: Maximilian.Graef@tu-dresden.de

eingereicht am: April 23, 2018

Betreuer: Prof. Dr.-Ing Raimund Dachsel
Patrick Reipschläger (M.Sc.)

Maximilian Gräf

*Analyse von 3D-Visualisierungen durch die Kombination von interaktiven Oberflächen mit
Augmented Reality Head-Mounted Displays*

Master-Thesis, April 23, 2018

Betreuer: Prof. Dr.-Ing Raimund Dachzelt und Patrick Reipschläger (M.Sc.)

Technische Universität Dresden

Professur für Multimedia-Technologie

Institut für Software- und Multimediatechnik

Fakultät Informatik

Nöthnitzer Str. 46

01062 and Dresden

Kurzzusammenfassung

Dreidimensionale Informationsvisualisierungen fördern durch den geringen Grad an Abstraktion die Bildung eines präzisen mentalen Modells und können daher multidimensionale räumliche Beziehungen greifbar kommunizieren. Gleichzeitig eröffnet die aktuelle Generation von Augmented Reality Head-Mounted Displays (AR-HMDs) neuartige Möglichkeiten zur Exploration von 3D-InfoVis und ist befähigt virtuelle Objekte glaubwürdig und immersiv in die physische Umgebung eines Nutzers zu integrieren. Dennoch unterliegt die Interaktion in AR-Umgebungen einer Vielzahl von Herausforderungen, da die signifikante Mehrheit der Applikationen lediglich Blick-, Freihandgesten- oder Sprachsteuerung als Eingabemodalität in Betracht ziehen. Durch Kombination von interaktiven Oberflächen wie Tabletops mit AR-HMDs können diese Nachteile effizient adressiert werden, indem direkte und natürliche Manipulation in Form von Multi-Touch, Tangible- oder Stift-Eingabe ermöglicht wird.

Im Rahmen dieser Thesis wird untersucht, wie die Analyse von 3D-InfoVis bei Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs unterstützt werden kann. Hierfür wird der aktuelle Stand der Forschung in themennahen Domänen erfasst und folgend Konzepte zur Unterstützung analytischer Prozesse in zuvor erläuteter Systemkonstellation entwickelt. Die resultierenden Konzepte adressieren dabei Limitationen, die bei Darstellung und Interaktion von und mit 3D-InfoVis in konventionellen Systemen bestehen und im Rahmen der Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs gelöst oder wesentlich angereichert werden können. Ausgewählte Features wurden in einer prototypischen Implementierung realisiert und getestet.

Abstract

Three-dimensional information visualizations aid precise mental models and are able to communicate multidimensional-spatial relations due to their low level of abstraction. Simultaneously the current generation of Augmented Reality head-mounted displays (AR-HMDs) are offering novel chances for the exploration of 3D-InfoVis and are capable of immersively integrating virtual objects into the physical environment of a user. Nevertheless, interaction in AR-environments is still posing a major challenge due to most applications only considering gaze, freehand gesture or speech as input modalities. By combining AR-HMDs with interactive surfaces these limitations can be addressed and direct and natural interaction in the form of multi-touch-, tangible- or pen-input can be enabled.

In the scope of this thesis it will be examined how the analysis of 3D-InfoVis can be supported in the context of combining interactive surfaces with AR-HMDs. Therefore the current state of research in associated domains is being summarized and based on that concepts for supporting analytical processes in aforementioned system constellation are being developed. The resulting concepts help addressing limitations, that exist in the representation and interaction of and with 3D-InfoVis in conventional systems in the scope of combining interactive surfaces with AR-HMDs in order to overcome them or reduce their effects. Selected features were implemented and tested in a prototype.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation des Anwendungskontextes	1
1.2	Definition der Zielstellung	3
1.3	Struktur dieser Thesis	3
2	Verwandte Arbeiten	5
2.1	Mixed, Augmented und Virtual Reality	5
2.2	Unterstützung analytischer Prozesse	6
2.2.1	Visual Analytics	6
2.2.2	Immersive Analytics	7
2.2.3	InfoVis im Kontext immersiver VR und AR	9
2.3	Interaktion mit 3D-InfoVis	13
2.3.1	Interaktionsaufgaben	13
2.3.2	Werkzeuge	14
2.4	Zusammenfassung	20
3	Konzept der Augmented Displays	21
3.1	Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs	21
3.2	Komponenten des Konzepts	23
3.2.1	Systeme und enthaltene Entitäten	23
3.2.2	Relation zwischen Systemen und Entitäten	23
4	Konzepte zur Unterstützung analytischer Prozesse im Umgang mit 3D-InfoVis bei Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs	25
4.1	Vorteile des „Augmented Displays“-Konzepts	25
4.2	Aufgaben, Abläufe und Benutzerschnittstellen	26
4.2.1	Generalisierte Interaktionsaufgaben	26
4.2.2	Interaktionsabläufe zur Umsetzung der Grundaufgaben	27
4.2.3	Benutzerschnittstellen	30
4.3	Geeignete InfoVis-Techniken	31
4.3.1	Repräsentation multivariater Daten	31
4.3.2	Repräsentation von Relationen	33
4.3.3	Repräsentation geografischer Daten	34
4.3.4	Repräsentation zeitbasierter Daten	35
4.4	Grundlegende Interaktions- und Visualisierungskonzepte	36
4.4.1	Verketten von Informationsvisualisierungen	36
4.4.2	Repräsentation der Selektionsmengen	37
4.4.3	Rotation von Informationsvisualisierungen	37
4.4.4	Auslagerung von UI-Elementen in den AR-Darstellungsraum	38

4.4.5	Miniaturansicht erstellter Informationsvisualisierungen	39
4.4.6	Nahtloser Wechsel zwischen Visualisierungen	40
4.5	Werkzeuge zur Unterstützung analytischer Prozesse	41
4.5.1	Kategorisierung der analytischen Werkzeuge	41
4.5.2	Generische Analyse-Werkzeuge	42
4.6	Zusammenfassung	52
5	Implementierung	53
5.1	Technische Rahmenbedingungen	53
5.2	Verwendete Datensätze	54
5.3	Bestandteile und Merkmale der prototypischen Implementierung	55
5.4	Umgesetzte Features	57
5.4.1	Erstellen von Informationsvisualisierungen	57
5.4.2	Werkzeuge ohne räumlichen Bezug	60
5.4.3	Werkzeuge mit räumlichen Bezug	61
5.4.4	Verketteten von Informationsvisualisierungen und Miniaturansichten	62
5.5	Technische Limitierungen	63
5.6	Zusammenfassung	64
6	Diskussion	67
6.1	Nähe des Nutzers zu AR-Hologrammen	67
6.2	Verdeckung der interaktiven Oberfläche durch AR-Hologramme	68
6.3	Interaktion und Wahrnehmung des zugehörigen visuellen Feedbacks	68
6.4	Touch-zentrierte-Interaktion und UI-Elemente	69
6.5	Analyse von 3D-Informationsvisualisierungen	69
6.6	Fokus auf dreidimensionale Visualisierungen als AR-Hologramme	70
7	Zusammenfassung und Ausblick	71
7.1	Zusammenfassung	71
7.2	Fragestellungen für zukünftige Untersuchungen	72
	Literatur	75

Einleitung

“ The purpose of visualization is insight, not pictures. ”

— Ben Shneiderman
(US-amerikanischer HCI-Experte)

Informationsverarbeitung stellt ein bedeutendes Fundament unserer modernen Gesellschaft dar. Daher ist im Umgang mit Datensätzen jeglicher Art das Gewinnen von Erkenntnissen eine wesentliche Aufgabe. Die Disziplin der Informationsvisualisierung (InfoVis) ist eine essentielle Technik um bildlosen Daten eine Erscheinung zu geben (*siehe Abbildung 1.1*) und Betrachtern beim Verständnis zu unterstützen [Fek+08]. Das konkrete Erscheinungsbild von Informationsvisualisierungen steht dabei in direktem Zusammenhang mit der Beschaffenheit der zugrundeliegenden Daten, den Möglichkeiten der Ein-/Ausgabemedien, sowie den Anforderungen des Nutzers. Da ebendiese Daten kontinuierlich reichhaltiger, die Ein-/Ausgabemedien leistungsfähiger und die Anforderungen des Nutzers individueller werden, ist es notwendig bestehende Konzepte zu hinterfragen und ggbf. anzupassen bzw. neu zu definieren. Daher ist moderne InfoVis nicht nur ein reines Werkzeug zur Visualisierung - sondern viel mehr eine Vermittlungsschicht, die kommunizierend zwischen Daten und Anwender agiert. Im Folgenden wird der thematische Rahmen dieser Master-Thesis aufgespannt, indem der Anwendungskontext motiviert, die Zielstellung definiert und ein Überblick über die Struktur dieser Arbeit gegeben wird.

1.1 Motivation des Anwendungskontextes

InfoVis ist ein fester Bestandteil der Informationswahrnehmung in unserem Alltag - ob in einer Fahrplan-Darstellung an der Bahnhaltestelle, der Wetter-Prognose in den Abendnachrichten, statistischen Abbildungen in der Tageszeitung oder dem Online-Preisvergleich-Portal. Immer dann, wenn die Bedeutung großer Datensätze vermittelt werden soll - ist InfoVis ein geeignetes Mittel zur Kommunikation und Kodierung. Dabei werden vorrangig 2D-Techniken angewandt, da unsere Ausgabemedien (z.B. Desktop-Monitor, Smartphones, Tablets oder Print-Medien) ebenso zweidimensional sind.

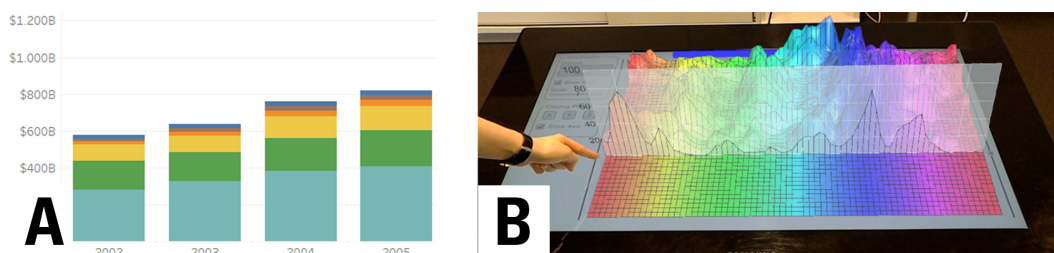


Abb. 1.1: A: 2D-Balkendiagramm erstellt mit „Tableau“ [Sof]. B: 3D-Höhenkarte in Reipschläger's und Dachsel's „Augmented Displays“ (unpubliziert) [Rei18].

Die Disziplin der 3D-InfoVis stand bisher tendenziell im Schatten von konventionellen zweidimensionalen Visualisierungstechniken. Dabei kann die Hinzunahme einer dritten, planar abgetragenen, Dimension den Ausdruck und Umgang mit visualisierten Daten stark bereichern. Diese wirken nicht nur visuell ansprechender, sondern können durch den geringeren Grad an Abstraktion räumliche Zusammenhänge verständlich kodieren. Weitere Vorzüge von 3D-InfoVis sind laut Brath: Präzisere Kodierung von Position und Länge, Möglichkeit zur Darstellung von Objekten und gekrümmten Flächen in verschiedenen Perspektiven, räumliche Trennung von Datenobjekten, sowie der Einsatz von Beleuchtungsmodellen [Pap16]. Sämtliche zuvor genannten Eigenschaften sind förderlich zur Bildung eines präzisen mentalen Modells, welches multidimensionale räumliche Beziehungen greifbar kommunizieren kann.

Um einen kontextgerechten Einsatz von 3D-InfoVis zu fördern, genügt es nicht sich den existierenden Visualisierungs- und Interaktions-Techniken aus dem zweidimensionalen Pendant zu bedienen. Stattdessen müssen bestehende Konzepte adaptiert oder gar neu erdacht werden. Die häufig im Rahmen von 3D-InfoVis angeführten Defizite sollten dabei vielmehr als Herausforderung angesehen werden. Im Konkreten sind die betitelten Limitierungen: gegenseitige *Verdeckung* der visualisierten Datenobjekte, menschliche *Fehlinterpretation* von Distanz, Größe und Perspektive und die Tatsache, dass 3D-Umgebungen im Kontext von 2D-Ausgabemedien *nicht glaubwürdig immersiv* sind, da durch die planare Projektion wertvolle Wahrnehmungsinformationen verloren gehen.

Zum Überwinden dieser Limitierungen existieren verschiedene Möglichkeiten, wie etwa die Verwendung: visueller Cues (z.B. Shading), stereoskopischer Darstellungen oder kopfgelundener Perspektive. Besonders effektiv ist darüber hinaus der Einsatz von Navigationstechniken, um den Blickwinkel auf die 3D-InfoVis beliebig zu verändern. Konventionelle Eingabemethoden (z.B. Maus- und Tastatur) stellen hierfür lediglich eine kompromissbehaftete Plattform bereit, welche oftmals mit einer erhöhten kognitiven Auslastung einhergeht. Dies sorgt laut Brath dafür, dass mehr mentale Kapazität für die Navigation aufgebracht werden muss, als für die eigentliche Aufgabe des Nutzers [Pap16].

Die aktuell aufstrebende Technologie der *Mixed Reality Plattformen* stellt eine verheißungsvolle Alternative zu konventionellen Darstellungsmedien für 3D-Umgebungen und somit auch 3D-InfoVis dar. Durch die stereoskopische Sicht auf die Visualisierung können Tiefen- bzw. perspektivische Informationen wesentlich besser, als auf 2D-Displays, kodiert werden [Tor+06]. Sogenannte Head-Mounted Displays (HMDs) lassen sich der Kategorie der Mixed Reality Plattformen zuordnen und eignen sich zur Darstellung immersiver 3D-Umgebungen. Raja et al. bestätigten bereits 2004 die Vorzüge immersiver InfoVis im Vergleich zu nicht immersiver hinsichtlich Wahrnehmung und Task-Performance [Raj+04].

Zur visuellen Ausgabe bedienen sich AR-HMDs Technologien, wie z.B. Netzhaut-Projektion, See-through Displays oder wie bei der Microsoft „HoloLens“ einem Verfahren, bei dem die AR-Hologramme durch Kombination mehrschichtiger Projektion realisiert werden [Cora]. Darüber ist diese mit einer Reihe von Sensoren ausgestattet, welche unter Anderem ein Tiefenbild der physischen Umgebung des Nutzers generieren. Hierdurch werden physische Bewegungen in der realen Welt auf die Navigation in der Digitalen abgebildet.

Eine Studie von Tory et al. suggeriert, dass eine Kombination von 2D- und 3D-Visualisierungen auf einem Ausgabemedium sich darüber hinaus als förderlich für die Task-Performance erweisen kann [Tor+06]. Daher gibt es verschiedene Konzepte hinsichtlich der Kombination von Mixed-Reality HMDs und konventionellen Ausgabemedien. Ein konkretes Beispiel stellt das Konzept der „Augmented Displays“ dar, welches in einer unveröffentlichten Publikation von Reipschläger und Dachzelt präsentiert wurde [Rei18]. Diese verknüpfen ein AR-Medium (z.B. Microsoft HoloLens) mit einer interaktiven Oberfläche (z.B. Tabletop). Dabei werden die, auf der interaktiven Oberfläche dargestellten Inhalte durch AR-Hologramme erweitert. Diese Technik eröffnet neue Chancen, um einen konventionellen Darstellungsraum in einer immersiven Umgebung anzureichern.

1.2 Definition der Zielstellung

Ziel dieser Master-Thesis ist es zu untersuchen, wie die Analyse von 3D-InfoVis durch die Kombination von interaktiven Oberflächen mit AR-HMDs unterstützt werden kann. Neben der Untersuchung allgemeiner Aspekte, welche sich durch die Kombination dieser beiden Systeme ergeben, sollen Interaktionskonzepte und Analysewerkzeuge zur Unterstützung analytischer Prozesse im Umgang mit 3D-InfoVis entwickelt werden. Darüber hinaus sollen ausgewählte Konzepte prototypisch in einer Beispielanwendung umgesetzt werden. Hardwareseitig erfolgt die Verknüpfung der Microsoft „HoloLens“ mit einer interaktiven Oberfläche in Form eines Tabletops [Cora]. Softwareseitig erfolgt die Verwendung der Unity-Engine (in Verbindung mit der Programmiersprache C#), da diese eine ausgefeilte Plattform zur Entwicklung von Mixed Reality Applikationen bereitstellt [Uni].

1.3 Struktur dieser Thesis

In den folgenden sechs Kapiteln werden schrittweise: Grundlagen, Konzepte, Implementierung, sowie die Ergebnisse dieser Arbeit präsentiert, diskutiert und zusammengefasst.

Kapitel 2: Verwandte Arbeiten

Durch die Untersuchung themennaher verwandter Arbeiten wird der aktuelle Stand der Forschung erfasst, existierende Lösungen präsentiert und bestehende Herausforderungen, die bei der Konzeption bedacht werden sollen, identifiziert.

Kapitel 3: Konzept der Augmented Displays

Erörterung von Reipschläger's und Dachzelt's „Augmented Displays“-Konzept (unpubliziert), welches die Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs betrachtet [Rei18].

Kapitel 4: Konzepte zur Unterstützung analytischer Prozesse im Umgang mit 3D-InfoVis bei Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs

Im Rahmen der zuvor definierten Systemkonstellation werden zunächst die Vorteile von „Augmented Displays“ erörtert, verschiedene Interaktionsaufgaben generalisiert, Interaktionsabläufe spezifiziert, Benutzerschnittstellen definiert, die Eignung verschiedener InfoVis-Techniken diskutiert, sowie grundlegende Interaktionstechniken und Werkzeuge zur Unterstützung analytischer Prozesse konzipiert.

Kapitel 5: Implementierung

Beschreibung der Rahmenbedingung, der verwendeten Datensätze, der Struktur und umgesetzten Features der realisierten prototypischen Implementierung, sowie eine Diskussion der aktuell bestehenden technischen Limitierungen.

Kapitel 6: Diskussion

Kritische Auswertung der Konzepte und Ergebnisse dieser Arbeit hinsichtlich verschiedener Herausforderungen und Erkenntnisse, die beim Testen des Prototypen identifiziert wurden.

Kapitel 7: Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung der wesentlichen Inhalte dieser Thesis und Erörterung verschiedener Fragestellungen und Ansätze, welche für zukünftige Forschungen in diesem Kontext von hoher Relevanz sind.

Verwandte Arbeiten

Die technologischen Fortentwicklungen der letzten Jahre ebneten den Weg für neuartige Applikationen (siehe Abbildung 2.1), die unter den Akronymen: *Mixed*, *Augmented* und *Virtual Reality* in unserem Alltag Einzug nehmen. Dementsprechend viel Forschung wurde in diesen Domänen bereits betrieben, welche in diesem Kapitel themenbezogen erörtert wird. Um die anschließende Konzeption zu fundamentieren, werden folgend die Themenbereiche: Mixed Reality, Unterstützung analytischer Prozesse und Analyse im Kontext von 3D-Infovis untersucht.

2.1 Mixed, Augmented und Virtual Reality

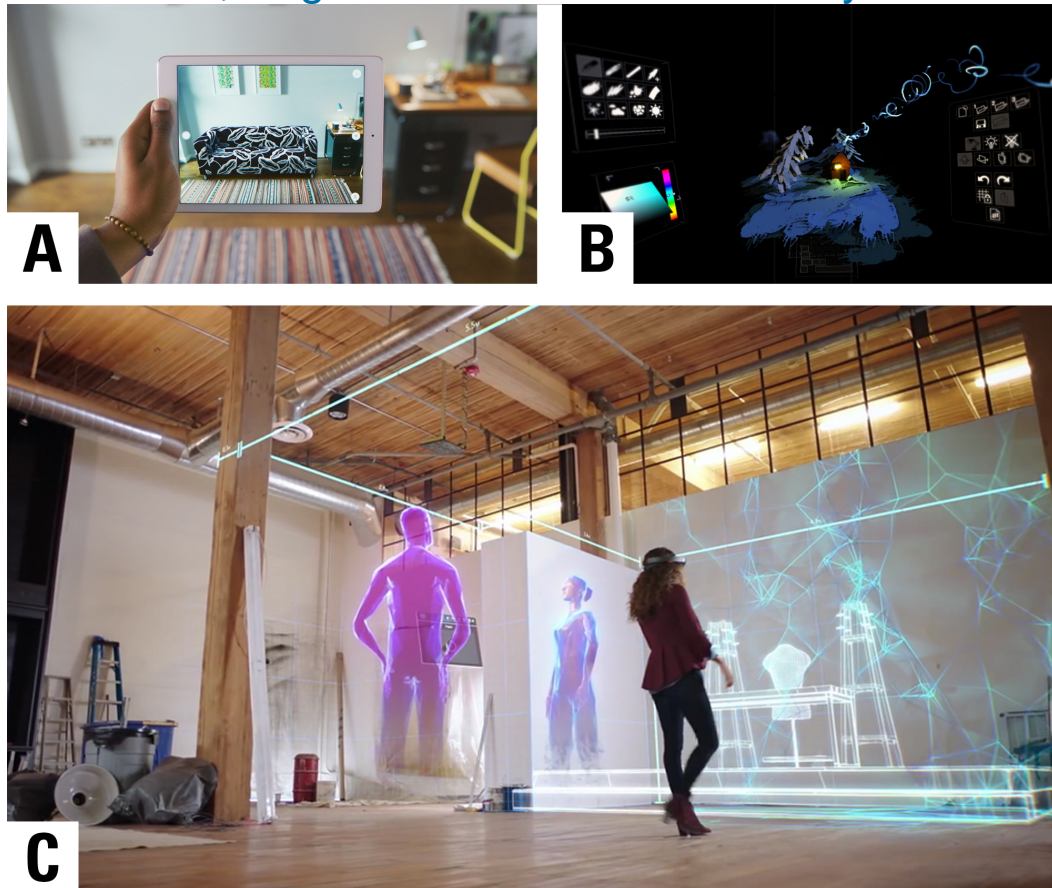


Abb. 2.1: Beispiel-Applikationen von Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR) und Mixed Reality (MR). **A:** IKEAs „Place“ stellt eine klassische AR-Applikation dar [Jos] [CK]. **B:** Virtual Reality in Googles „Tilt Brush“-Umgebung [Lan] [Inc]. **C:** Konzeptgrafik einer Mixed Reality Applikation unter Verwendung der Microsoft „HoloLens“ [Kan] [Cora].



Abb. 2.2: Visualisierung des von Milgram et al. definierten „Realitäts-Virtualitäts Kontinuum’s“ [Kjo] [Mil+95].

Das von Milgram et al. definierte „*Realitäts-Virtualitäts Kontinuum*“ umfasst sämtliche Variationen zwischen einer realen und vollständig synthetischen Umgebung [Mil+95]. Im Zwischenbereich dieser beiden Pole, der als *Mixed Reality* (z. Dt. „Vermischte Realität“) bezeichnet wird, existieren verschieden klassifizierbare Systeme, bei denen das Maß an Realität und Virtualität jeweils unterschiedlich ausgeprägt ist (siehe Abbildung 2.2). Die daraus resultierende Umgebung charakterisiert sich insbesondere durch einen hohen Grad an Dynamik und Interaktivität.

Augmented Reality (z. Dt. „Erweiterte Realität“) bezeichnet nach Preim et al. die „Überlagerung der realen Welt durch computergenerierte Informationen [...]“ [PD10]. Hierbei fungiert die Realität als rahmengebende Umgebung, in die virtuelle Objekte integriert werden. Die Ausgabe kann bei kamerafähigen Mobilgeräten (z.B. Smartphones und Tablets) mittels „video-see-through“-Techniken und bei stereoskopischen Head-Mounted Displays über Netzhaut-Projektion, „See-through displays“, oder mehrschichtigen optischen Projektionen (z.B. bei Microsoft’s „HoloLens“) erfolgen [Cora].

Virtual Reality (z. Dt. „Virtuelle Realität“) ist durch eine vollständig synthetische und immersive Umgebung charakterisiert, in der nach Preim et al. „eine virtuelle Welt in Echtzeit interaktiv exploriert und manipuliert werden kann“ [PD10]. Der Nutzer ist hierbei visuell von der realen Welt abgeschiedet. Als Ausgabemedium bedient sich VR an stereoskopischen HMDs (z.B. Oculus Rift [OV]), welche Sichtfeld abdeckende OLED-Displays beinhalten oder alternativ Systemen mit räumlicher Projektion, wie z.B. der „CAVE“-Umgebung [CN+92].

2.2 Unterstützung analytischer Prozesse

2.2.1 Visual Analytics

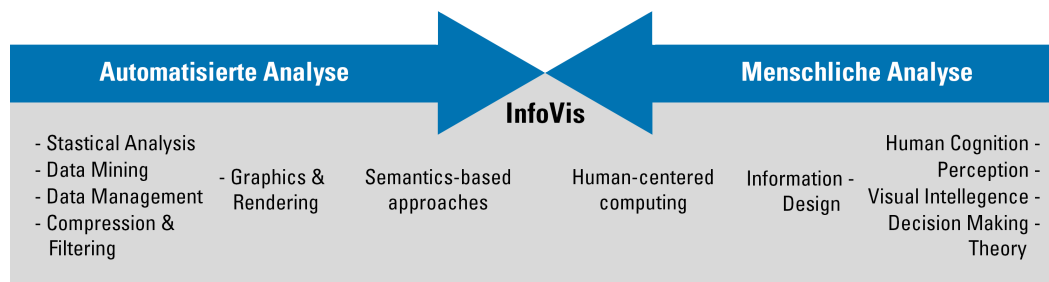


Abb. 2.3: Visualisierung verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen, die nach Keim et al. mit Visual Analytics in Zusammenhang stehen [Kei+08].

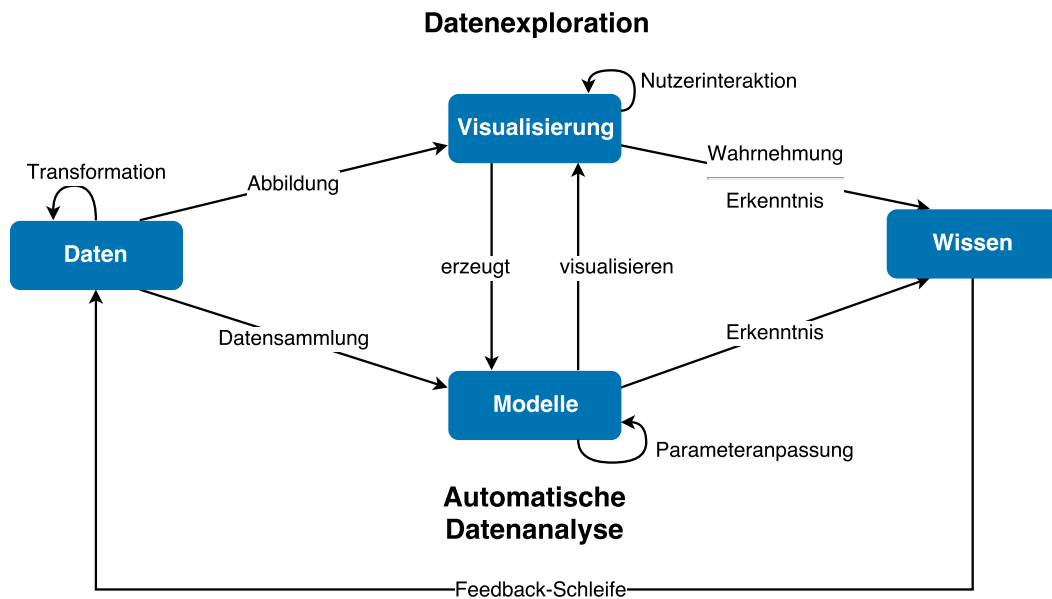


Abb. 2.4: Visualisierung des von Keim et al. spezifizierten *Visual Analytics* Prozesses [Kei+10]. Dieser ist durch: Interaktion mit Daten und deren Visualisierungen, dem Generieren mentaler Modelle, sowie dem nutzerseitigen Erschließen von Wissen auf Basis der Modelle und Visualisierungen charakterisiert.

Automatisierte Datenanalyse ermöglicht uns nahezu unverzüglichen Einblick in komplex strukturierte Datensätze. Die Fähigkeit des Menschen, aus einer Vielzahl visueller Eindrücke komplexe Schlussfolgerungen zu treffen, ergänzt dabei diesen Prozess. Dies erkannten Thomas et al. bereits 2005 und prägten das interdisziplinäre Forschungsgebiet „*Visual Analytics*“ (VA) (siehe Abbildung 2.3) [TC05]. Hierbei werden Methodiken automatisierter und menschlicher Datenanalyse kombiniert, indem interaktive Informationsvisualisierungen als zentrale Brücke zwischen diesen beiden Domänen dienen. Die wesentlichen Vorzüge von VA sind dabei laut Keim et al., dass: Interaktion ermöglicht, Verständnis und Schlussfolgerungen gefördert und ultimativ bessere Entscheidungen getroffen werden können [Kei+08]. In einer späteren Publikation charakterisieren Keim et al. den VA-Prozess (siehe Abbildung 2.4) bestehend aus den 4 Entitäten: Daten, Visualisierung, Wissen und mentalen Modellen [Kei+10].

Obwohl *Visual Analytics* die moderne Datenanalyse wesentlich geprägt und in dem letzten Jahrzehnt viel Aufmerksamkeit seitens der Forschung erhalten hat, finden sich die meisten VA-Applikationen im Kontext traditioneller Desktop-Systeme und zweidimensionaler Ausgabegeräte wieder.

2.2.2 Immersive Analytics

Technische Fortschritte und breite Verfügbarkeit 3D-fähiger Hardware ermöglichen aus Nutzersicht wesentlich zugänglichere und immersivere Applikationen als je zuvor. Die bereits in Kapitel 1.1 erörterte Kontroverse zwischen 2D- und 3D-InfoVis kann in Anbetracht des heutigen Standes der Technik mit völlig neuen Argumenten geführt werden. Cliquet et al.

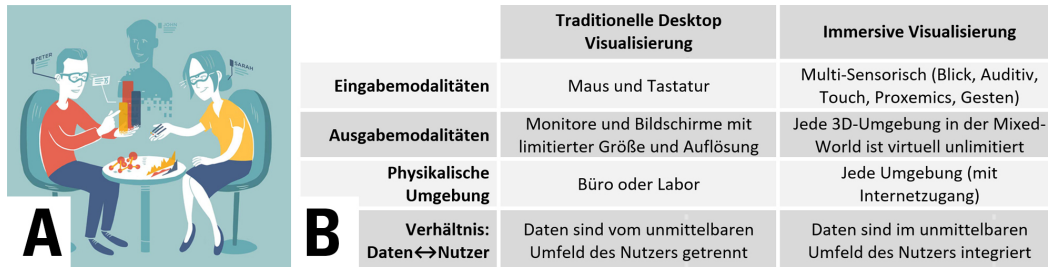


Abb. 2.5: A: Vision von Chandler et al. - *Immersive Analytics* als eine Möglichkeit zur kollaborativen Analyse von Daten in immersiven und hochinteraktiven Umgebungen [Cha+15]. B: Gegenüberstellender Vergleich traditioneller und immersiver Umgebungen nach Lu et al. [Lu+17].

argumentieren, dass insbesondere die glaubwürdige Darstellung von Tiefeninformationen bei modernen 3D-Ausgabegeräten zu einem hohen Grad an Immersion beiträgt und das Verständnis von komplexen abstrakten Repräsentationen maßgeblich fördern kann [Cli+17]. Ein konkretes Resultat, der zuvor erwähnten technologischen Verbesserungen, ist das aufstrebende Forschungsgebiet, welches von Chandler et al. mit dem Oberbegriff „*Immersive Analytics*“ betitelt wird [Cha+15]. Dieses knüpft an die Grundsätze der *Visual Analytics* an und rückt jene in den Kontext moderner Interaktions- und Ausgabemedien. Zentrales Ziel ist es Datensätze in ihrer vollen Komplexität in immersiven Analyse-Umgebungen zugänglich zu machen. Im Vergleich zu konventionellen Systemen ist der Nutzer also direkt in den Kontext involviert und nicht nur passiver Betrachter (siehe Abbildung 2.5). Immersive Umgebungen zeichnen sich nach Rosenbaum et al. durch die folgenden drei Kerneigenschaften aus [Ros+11]:

1. physikalische Präsenz - der Nutzer ist Bestandteil der Szene
2. Head-Based Rendering - als vertraute und natürliche Perspektive
3. Stereoskopische Sicht - als Grundlage zur präzisen und schnellen Tiefenwahrnehmung

Obwohl *Immersive Analytics* sich nicht auf stereoskopische oder 3D-fähige Ausgabemedien limitiert, verwenden eine Vielzahl der Beispielapplikationen (siehe Kapitel 2.2.3) Head-Mounted Displays (HMDs) als zentrales Ausgabemedium. Dies resultiert insbesondere daraus, dass HMDs, wie die Microsoft HoloLens (Kostenpunkt: 3.000 \$ [Cora]), im Vergleich zu ähnlich immersiven Umgebungen, wie das CAVE2-System (Kostenpunkt: 926.000 \$ [Feb+13]), nicht nur wesentlich kostengünstiger, sondern auch flexibler einsetzbar sind. Darüber hinaus sind HMDs in Anbetracht von kollaborativen Szenarien beliebig skalierbar.

Im Hinblick auf die Förderung zukünftiger Forschungen definieren Cliquet et al. im Kontext der *Immersive Analytics* folgende fünf Prinzipien [Cli+17]:

1. Betrachten realitätsnaher Anwendungskontexte für immersive Analyse
2. In Betracht ziehen sämtlicher physischer Freiheitsgrade des Nutzers
3. Berücksichtigen der Möglichkeiten und Limitationen menschlicher Wahrnehmung
4. Anwendung von iterativen Design-Prozessen unter Verwendung von Evaluation
5. Teilen von immersiven Applikationen mit Communities

2.2.3 InfoVis im Kontext immersiver VR und AR

VR-Umgebungen sind in ihrer Darstellung vollständig synthetisch und somit von der Realität entkoppelt. Im Kontext der in Kapitel 2.2.1 erläuterten *Immersive Analytics* wurden zahlreiche Forschungsarbeiten publiziert, die 3D-InfoVis in immersiven VR-Umgebungen betrachten. Bereits seit mehreren Jahrzehnten wird in diesem Kontext Forschung betrieben. Young et al. entwickelten 1998 mit „Imsovision“ eine Applikation zur Exploration Objektorientierter Software in VR unter Verwendung des CAVE-Systems als Ausgabegerät [YM98]. Kwon et al. rückten Exploration und Interaktion mit 3D-Graphvisualisierungen in den Kontext immersiver VR-Umgebungen und definierten dafür insbesondere immersions-taugliche Layouting-Algorithmen (siehe Abbildung 2.6) [Kwo+16]. Mittels der vorgestellten Techniken waren Probanden in der Lage komplexe Aufgaben schneller und effizienter zu lösen, als im Kontext eines zweidimensional kodierten Graphen. Zhang et al. betrachteten ein ähnliches Szenario in ihrem „Spherical immersive model“, welches die Exploration sphärisch abgetragener räumlicher Relationen durch Blicksteuerung ermöglicht [Zha+16]. Filho et al. verglichen in ihrer Studie 2D- und 3D-Scatterplots in Desktop-Umgebungen mit immersiven 3D-Scatterplots in VR anhand verschiedener Tasks - wobei letztere Umgebung die beste Performance bei Klassifikations- und Tiefenwahrmungsaufgaben bot [Fil+17]. Billow's und Cottam's „GeoVisor“ ist ein immersives analytisches VR-System für geographische und abstrakte Visualisierungen [BC17] (siehe Abbildung 2.6). Hierbei wird eine zentrale Kartenvisualisierung als Ankerpunkt für eine Vielzahl weiterer, dem selben Datensatz entspringender, Visualisierungstechniken (z.B. Diagramme, Parallele-Koordinaten-Darstellungen oder Zeitleisten) verwendet. Die Idee einer zentralen immersiven Analyse-Umgebung, die das Erstellen und Verknüpfen von InfoVis ad-hoc ermöglicht, griffen Donalek et al. mit „iViz“ auf [Don+14], welches sie und andere Beteiligte als kommerzielles Projekt unter dem Namen „Virtualitics“ weiterentwickeln [VI]. Dabei soll ein Cross-plattformfähiges (Desktop, Mobile, AR, VR) und kollaboratives Datenanalyse-Tool entstehen, dass auf Machine-Learning-Algorithmen fundamentierte (siehe Abbildung 2.6).

Während VR-Umgebungen vollständig synthetisch sind, steht in immersiven AR-Umgebungen die Realität im Vordergrund. Diese stellt dabei den rahmengebenden Kontext dar, in dem virtuelle Objekte oder Teilumgebungen integriert werden. Hierdurch eröffnen sich im Vergleich zu VR Alternativen im Darstellungs- und Interaktionsraum.

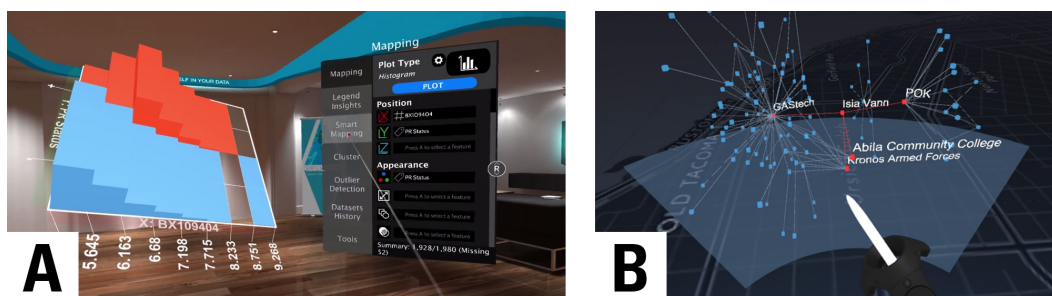


Abb. 2.6: **A:** Das kommerzielle „Virtualitics“-System stellt eine kollaborative und umfangreiche VR-Umgebung zur Datenanalyse bereit [VI]. **B:** Mit „GeoVisor“ präsentieren Billow und Cottam eine hochinteraktive VR-Umgebung, welche im Kontext vielfältiger InfoVis-Techniken immersive Analyse unterstützt [BC17].

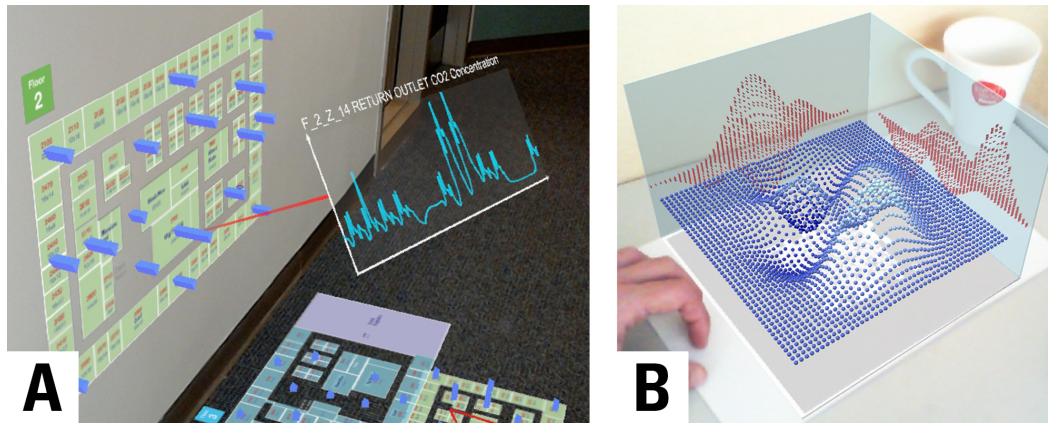


Abb. 2.7: **A:** Mahfoud et al. konzipieren eine immersive Analyse-Umgebung zum Krisen-Management in Gebäuden [ML17]. **B:** Ritsos et al. betrachten mit „Synthetic Visualizations“ die Generierung von InfoVis aus physisch kodierten Daten [Rit+17].

Kim et al. greifen mit „VisAR“ die Möglichkeit einer personalisierten AR-Nutzer-Schnittstelle auf, indem sie statische InfoVis mit interaktiven Elementen anreichern und somit fundamentale Datenanalyse ermöglichen [Kim+17]. Ritsos et al. verknüpften mit „Synthetic Visualizations“ 3D-InfoVis mit HMDs, um immersive analytische Umgebungen zu generieren, welche lediglich auf in AR- und QR-Markern kodierten Informationen basieren (siehe Abbildung 2.7) [Rit+17]. ElSayed et al. konzipierten mit „Situating Analytics“ eine AR-Applikation, welche als analytisches Tool für Objekte der realen Umgebung des Anwenders fungiert, indem verschiedene Interaktions- und Visualisierungstechniken bereitgestellt werden [ELS+16]. Herr et al. verknüpfen mit „ARSAM“ im Kontext der Fabrikplanung: Machine-Learning, Simulation von Herstellungsprozessen und interaktiver Analyse [Her+17]. Mahfoud et al. bewerten insbesondere die Computerinfrastruktur aktueller Mixed Reality Technologie als großes Potenzial, da simultane Datenanalyse und physische Interaktion im Kontext nur eines Systems möglich ist [ML17]. In ihrem entwickelten Prototyp (siehe Abbildung 2.7) stellen sie eine Analyse-Umgebung zum Detektieren abnormaler Ereignisse in einem heterogenen, multivariaten und zeitabhängigen Datensatz bereit. Hierbei werden mehrere physikalisch verankerte Informationsvisualisierungen mit visuellen Mitteln verknüpft.

Die zuvor erwähnten VR- und AR-Systeme decken vielfältige Szenarien ab, die durch ihre neuartigen Konzepte der immersiven Visualisierung und Interaktion eine Reihe unverbrauchter Anwendungskontexte erschließen können (siehe Abbildung 2.8). Dabei bedienen sich sämtliche erläuterten Publikationen einer oder mehrerer der folgenden Eingabemodalitäten: Controller-, Blick-, Sprach- oder Freihandgestensteuerung. Diesbezüglich verglichen Bach et al.: Desktop-, Tangible-AR-Tablet und Tangible-AR-HMD, indem ein identischer 3D-Scatterplot in allen Umgebungen bezüglich vier Tasks (Distanz- und Clusterabschätzung, Selektion und Schnittebene) in einer Nutzerstudie evaluiert wurde [Bac+17b]. Obwohl die Desktop-Umgebung als am schnellsten und präzisesten gewertet wurde, konkludieren die Forscher, dass in Hinblick auf zukünftige Untersuchungen die Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs Potenzial bietet. Genau dieses Szenario betrachteten Reipschläger und Dachsel mit „Augmented Displays“ (unpublizierte Forschungsarbeit), indem sie den konventionellen Darstellungsraum interaktiver Oberflächen (z.B. Tabletops) mit virtuellen Objekten, die über HMDs ins Sichtfeld des Nutzers projiziert werden, erweitert [Rei18].

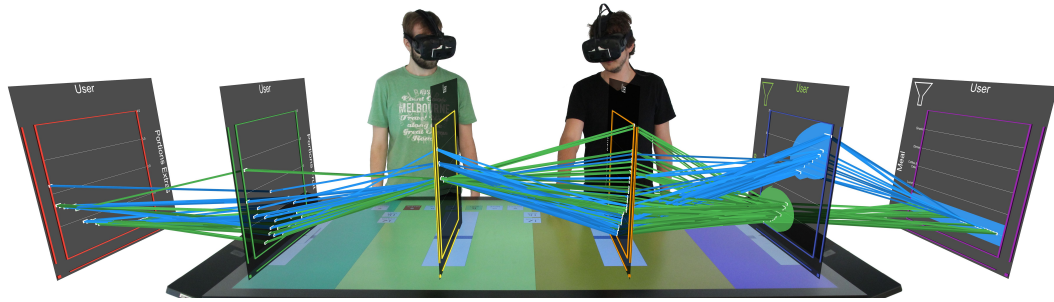


Abb. 2.8: Butscher et al.'s „ART“-System zur kollaborativen Analyse von multivariaten Datensätzen bei Kombination eines Tabletops mit einem AR-HMD [But+18].

Butscher et al. betrachten mit „ART“ (*Augmented Reality above Tabletop*) ebenfalls die Kombination touchfähiger Tabletop-Displays und AR-HMDs, um eine Applikation zur kollaborativen Analyse von multivariaten Datensätzen in immersiven Umgebungen bereitzustellen [But+18]. Hierbei wurden dreidimensionale Parallele Koordinaten Darstellungen räumlich über dem Tabletop verankert und konnten mittels Touch konfiguriert und analytisch untersucht werden. Zwei Expert-Walkthroughs evaluierten die Systeme hinsichtlich qualitativer Kriterien und resümierten, dass diese Systemkonstellation in Hinblick auf die Analyse von InfoVis effektive und flüssige Interaktion ermöglicht.

Abb. 2.9: Tabellarischer Überblick der betrachteten immersiven AR- und VR-Systeme.

Betrachtete immersive Systeme													
Publikationsjahr	Imsovision	Immersive Graph Visualization	Sphere Immersive Model	GeoVisor	Immersive Scatterplots	Virtualities	Situated Analytics	VISAR	Synthetic Visualizations	Abnormal Detection	ARSAM	Augmented Displays	ART
1998 [YM98]	VR	2016 [Kwo+16]	2016 [Zha+16]	2017 [BC17]	2017 [FH+17]	2017 [Vil17]	2016 [Eis+16]	2017 [Kim+17]	2017 [Rit+17]	2017 [ML17]	2017 [Her+17]	2018 [Re18]	2018 [BUT+18]
Klassifikation	VR	VR	VR	VR	VR	MR, VR	MR	MR	MR	MR	MR	MR	MR
Verwendete Visualisierungen	Räumliche Relationen	Graph	Graph	Liniendiagramme Streudiagramme Par. Koordinaten Zeitreihete Topic-Cluster	Streudiagramme	Balkendiagramme Liniendiagramme Streudiagramme Graph Matrix-Abbildung Weitere SciVis	Eingebettete Visualisierungen auf Basis statistischer Daten	Balkendiagramme Streudiagramme	Balkendiagramme Streudiagramme Höhenkarten	Balkendiagramme Liniendiagramme Räumliche Relationen Gebäudeplan	SciVis	3D-Modelle Höhenkarten Magische Linsen	3D Parallele Koordinaten
Eingabemodalitäten	Joystick mit 3 Knöpfen	Blicksteuerung	Blicksteuerung	Blicksteuerung Handheld Controller	Blicksteuerung Handheld Controller	Blick- und Gestensteuerung	Blick- und Gestensteuerung	Blick-, Sprach- und Gestensteuerung	Blicksteuerung	Blick-, Sprach- und Gestensteuerung	Blicksteuerung	Blicksteuerung Touch-Eingabe	Blicksteuerung Touch-Eingabe
Ausgabemodalitäten	CAVE	Oculus Rift	Oculus Rift	HTC Vive	Oculus Rift	Oculus Rift	Epson BT200 Tablet	Microsoft HoloLens	HMD	Microsoft HoloLens	Microsoft HoloLens	Microsoft HoloLens Interaktive Oberfläche	HTC Vive Microsoft Surface Hub
Software Prototyp	/	/	Unity	Unity, Steam VRTK-Toolkit	Unity	Unity	/	Unity	AR.js Instacanvas D3.js	Unity	/	Unity	/
betrachtete Interaktionsaufgaben Shneiderman Taxonomie [Sh96]	Overview Zoom Filter Details Relate History	Overview Filter	Overview	Overview Filter	Overview Filter Relate	Overview Zoom Filter Details Relate History Extract	Overview Filter Details Relate History Extract	Overview Filter Details Relate	/	Relate	Overview	Overview Filter	Overview Filter Relate
Anwendungskontext des Prototyps	Objekt-Orientierte Software	Allgemein	Analyse von Flüchtlingsströmen	Analyse räumlich-abhängiger Datensätze	Wahl des Abgeordnetenhaus in Brasilien	Analyse Astronomischer Aufzeichnungen	Einkauf von Lebensmitteln	Allgemein	Allgemein	Notfall-Management in einem Gebäude	Planung von Fabrikanlagen	3D-Sketching Exploration von 3D-InfoVis AR Magic Lenses	Kollaborative Analyse eines multivariaten Datensatzes
Besonderheiten	Identifizierte bereits 1998 das Potenzial von VR-Visualisierung	Großer Fokus auf Layouting-Algorithmen zur Darstellung vieler Kanten	Parametrisierbarer Edge-Bundling Algorithmus	Mit jeder InfoVis kann in ausgeprägtem Maß interagiert werden	Vergleichen immersive Umgebung mit 2D/3D-Scatterplot am auf Desktop	Kollaborative Plattform zur ad-hoc Erstellung von vielfältiger InfoVis	Analyse von Objekten der physikalischen Umgebung durch Anfragen	Anreicherung statischer Visualisierungen mit Interaktivität	Datensatz + Visualisierung ist physisch in AR- und QR-Marker kodiert	Verknüpfung von 2D- und 3D-InfoVis	Simulation, Vergleich und Analyse verschiedener Fabrikprozesse möglich	Kombination interaktiver Oberflächen mit AR	Kombination interaktiver Oberflächen mit AR + Kollaboration

Vergleichsdimensionen

2.3 Interaktion mit 3D-InfoVis

2.3.1 Interaktionsaufgaben

Durch das Einbeziehen einer dritten räumlichen Dimension in eine Visualisierung ergeben sich neue Möglichkeiten zur Kodierung multivariater Datensätze und somit auch eine Vielfalt an grundlegenden Interaktionsaufgaben. Es existieren verschiedene Taxonomien von Grundaufgaben im Kontext zweidimensionaler und dreidimensionaler InfoVis (siehe Abbildung 2.9). In beiden Domänen gilt das Interaktions-Schema „Overview first, zoom and filter, then details-on-demand“ (auch *Visual Information Seeking Mantra* von Shneiderman [Shn96]). Es beschreibt eine Herangehensweise an eine Visualisierung, bei der von einer Überblicksdarstellung ausgehend bestimmte Datenobjekte näher betrachtet und folgend Uninteressante herausgefiltert werden. Darüber hinaus definiert Shneiderman in selbiger Publikation die 7 Grundaufgaben im Umgang mit InfoVis: *Overview, Zoom, Filter, Details-on-demand, Relate, History* und *Extract*.

Amar et al. beziehen sich in ihrer Taxonomie auf einen analytischen Kontext und definieren die 10 Grundaufgaben: *Retrieve Value, Filter, Compute Derived Value, Find Extremum, Sort, Determine Range, Characterize Distribution, Find Anomalies, Cluster* und *Correlate* [Ama+05].

Bei Betrachtung aus dem Blickwinkel kognitiver Prozesse lässt sich *Bloom's Taxonomie* in der überarbeiteten Fassung von Anderson et al. anwenden (siehe Abbildung 2.9) [Blo56] [And+01]. Hierdurch werden die 6 kognitiven Aufgaben: *Remember, Understand, Apply, Analyze, Evaluate* und *Create* mit den 3 Wissensdimensionen: *Factual, Conceptual* und *Procedural Knowledge* gekreuzt. Saenz et al. planen diese Taxonomie als Beurteilungskriterium im Rahmen einer Nutzerstudie zu immersiven AR-3D-Visualisierungen anzuwenden [Sae+17].

Shneiderman Taxonomie [Shn96]		Amar et al. Low-Level Tasks [Ama+05]	
1. Overview	5. Relate	1. Retrieve Value	6. Determine Range
2. Zoom	6. History	2. Filter	7. Characterize Distribution
3. Filter	7. Extract	3. Compute Derived Value	8. Find Anomalies
4. Details-on-demand		4. Find Extremum	9. Cluster
		5. Sort	10. Correlate

Bloom's Taxonomie (überarbeitet von Anderson et al.) [And+01]				
Cognitive Process Dimension	Knowledge Dimension			
		Factual Knowledge	Conceptual Knowledge	Procedural Knowledge
	Remember	List	Describe	Reproduce
	Understand	Summarize	Interpret	Clarify
	Apply	Classify	Model	Execute
	Analyze	Order	Explain	Integrate
	Evaluate	Appraise	Assess	Critique
	Create	Generate	Assemble	Design

Abb. 2.10: Übersicht der drei Grundaufgaben-Taxonomien von: Shneiderman, Amar et al. und Anderson et al. [Shn96] [Ama+05] [And+01].

		Eingabemodalität					
		Touch	Blick	Freihandgesten	Proxemics	Wearables mit Display	Sprache
Interaktionsaufgabe	Visualisierung erstellen						
	Fokus auf Visualisierung						
	Objekt in Visualisierung selektieren						
	Objekt mit bestimmter Bezeichnung finden						
	Visualisierung filtern						
	Navigieren in der Visualisierung						
	Rekonfigurieren graphischer Eigenschaften						
	Rekonfigurieren der Daten-Abbildung						

Abb. 2.11: Übersicht nach Badam et al. über die Gebrauchstauglichkeit verschiedener Eingabemodalitäten in immersiven Umgebungen für grundlegende Interaktionsaufgaben [Bad+17].

- Am besten geeignet für diese Interaktionsaufgabe
- Geeignet für einfache Fälle dieser Interaktionsaufgabe
- Benötigt zusätzliche UI-Elemente für Eignung
- Keine direkte Eignung

Badam et al. wenden in einer Nutzerstudie, bei der die Forscher verschiedene Interaktionsmodalitäten in Bezug auf Grundaufgaben im Kontext immersiver Umgebungen evaluieren, die Taxonomie von Yi et al. an (siehe Abbildung 2.10) [Bad+17] [Yi+07]. Diese Taxonomie bezieht sich stark auf die Domäne der InfoVis und beinhaltet die 7 Aufgabenkategorien: *Select*, *Explore*, *Reconfigure*, *Encode*, *Abstract/Elaborate*, *Filter* und *Connect*.

2.3.2 Werkzeuge

Die Analyse von InfoVis ist ein wechselseitiger Prozess zwischen: Visualisierung abstrakter Daten und Bildung mentaler Modelle. Nutzerseitig fördert eine nachvollziehbare Abbildung dieses Vorgangs das Informationsverständnis und damit die Generierung neuen Wissens. Im Kontext dreidimensional räumlich abgetragener InfoVis, die einen multivariaten Datensatz kodiert, ist es aufgrund der Komplexität der Visualisierung nicht immer möglich direkte und unmissverständliche Einblicke zu gewähren. Dabei kann beispielsweise die gegenseitige Verdeckung von Datenobjekten den Überblick über den dargestellten Datensatz verfälschen, vielschichtige qualitative Datendimensionen nicht mehr effektiv kodiert oder eine komplexe Relationsstruktur zwischen den Datenobjekten nicht mehr nachvollziehbar dargestellt werden. Um den analytischen Prozess in Anbetracht zuvor beschriebener Herausforderungen dennoch effektiv zu gestalten bedarf es der Verwendung von Werkzeugen, die spezifische Intentionen des Nutzers unterstützen. Im Folgenden werden gängige Hilfsmittel dieser Kategorie vorgestellt.

Exploded Views

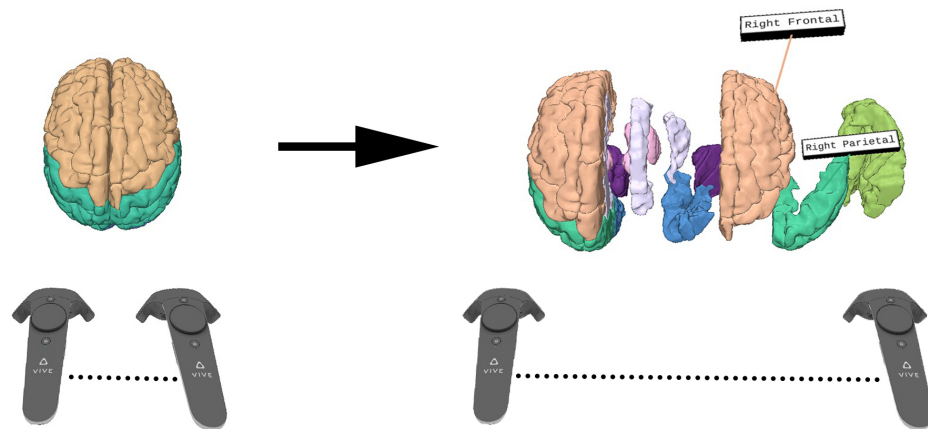


Abb. 2.12: He et al. wenden Explosive Views in einer immersiven VR-Umgebung zur Exploration eines medizinischen Atlas an [He+17].

Exploded Views (z. Dt. „Explosionsdarstellungen“) sind eine Technik, um die Komponenten komplexer Visualisierungen sichtbar zu machen. Dabei werden Datenobjekt-Mengen entlang vordefinierter oder berechneter Achsen verschoben und somit räumlich entfächert (siehe Abbildung 2.11). Geeignet ist diese Technik nur, wenn räumlich keine quantitativen Daten kodiert werden (z.B. in Graphen). Exploded Views ermöglichen das iterative Analysieren der Struktur verknüpfter Datenobjekte. Luboschik und Schumann betonen in dieser Hinsicht, dass visuell nachvollziehbare Animationen der „Explosion“ essentiell zum Verständnis dieser Technik ist [LS07]. Im Kontext immersiver VR-Umgebungen verwendeten beispielsweise He et al. und Chen et al. Explosive Views, um die iterative Zerlegung und Analyse komplexer Visualisierungen zu ermöglichen [He+17] [Che+17].

Cutaways und Ghost Views

Cutaways (z. Dt. „Abschneidungen“) bezeichnet eine illustrative Technik, bei der uninteressante Teile einer Visualisierung abgeschnitten werden, sodass zuvor verdeckte Objekte von Interesse sichtbar sind.

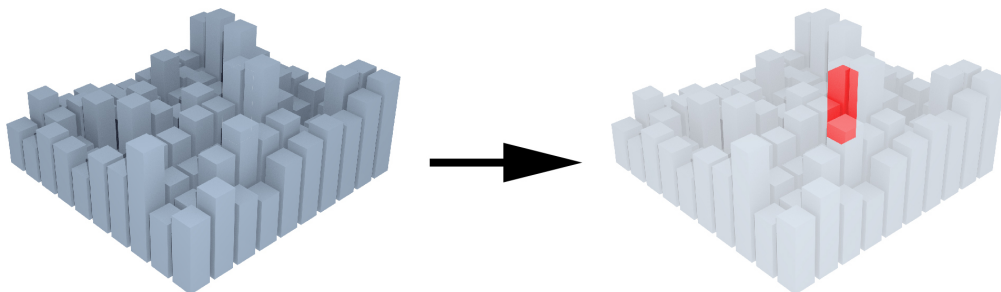


Abb. 2.13: Ghost View im Kontext eines 3D-Balkendiagramms mit dem Zweck einen verdeckten Balken (rot) sichtbar zu machen. (Grafik erstellt in Blender [Fou])

Ghost Views (z. Dt. „Geisterdarstellungen“) bezeichnen ein gleichartiges Konzept, bei dem die uninteressanten Teile mittels Transparenz nahezu ausgeblendet, anstatt vollständig abgeschnitten zu werden. Dies hat den Vorteil, dass die Objekte von Interesse weiterhin in dem umgebenden Kontext eingebettet sind und simultan mögliche Verdeckungen aufgelöst werden. Ursprünglich von Diepstraten in Hinblick auf technische und medizinische Illustrationen konzeptioniert [Die06], adaptierten Luboschick und Schumann dieses Konzept für die Disziplin der InfoVis [LS08]. Dafür entwickelten die Forscher einen speziellen Algorithmus, der Verdeckungen in Hinblick auf interessante Datenobjekte auflöst (siehe Abbildung 2.12).

Clipping Planes

Clipping Planes (z. Dt. „Schnittebenen“) dienen in ihrer Grundform zur Definition einer begrenzenden funktionalen Ebene in einem Raum. Dabei können z.B. alle Werte dieser Ebene in isolierter oder angepasster Form dargestellt werden, wobei oftmals eine Rückführung zu einer zweidimensionalen Repräsentation erfolgt. Diese Technik wird verwendet um analytische Prozesse, wie das Filtern und Selektieren von Datenobjekten zu ermöglichen oder die Sichtbarkeit individueller Werte zu steigern. Hierdurch wird in der Regel ein Teil der Datenobjekte ausgeblendet und potenzielle Verdeckungen aufgelöst. Preim et al. halten fest, dass sich Clipping Planes insbesondere zur Analyse komplexer 3D-Daten eignen und unterscheiden zwischen vier Arten von Schnittebenen: achsenparallel, beliebig orientierbar, selektiv (auf Basis von Features) und lokal (in begrenztem Bereich) [PD10]. Roscher untersuchte in seiner Bachelor-Thesis die „Verwendung von Ebenen-Werkzeugen zur Interaktion mit räumlicher 3D-Informationsvisualisierung“ und konzeptionierte verschiedene Clipping Plane Techniken, die analytische Prozesse unterstützen [Ros16]. Reipschläger und Dachsel betrachteten im Rahmen des unpublizierten „Augmented Display“-Konzepts die Verwendung einer Clipping Plane im Kontext einer immersiven 3D-Höhenkarte (siehe Abbildung 2.13) [Rei18].

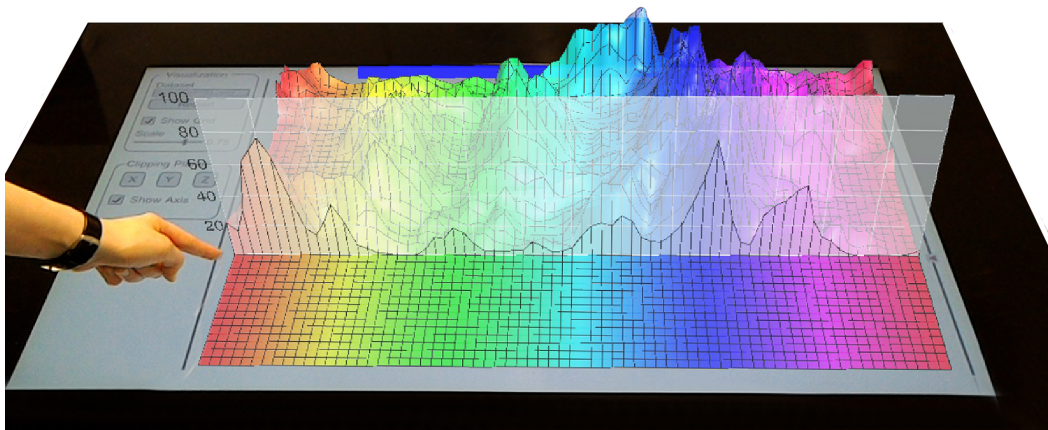


Abb. 2.14: Clipping Plane im Kontext einer 3D-Höhenkarten-Visualisierung von Reipschlägers „Augmented Displays“ [Rei18].

Magic Lenses

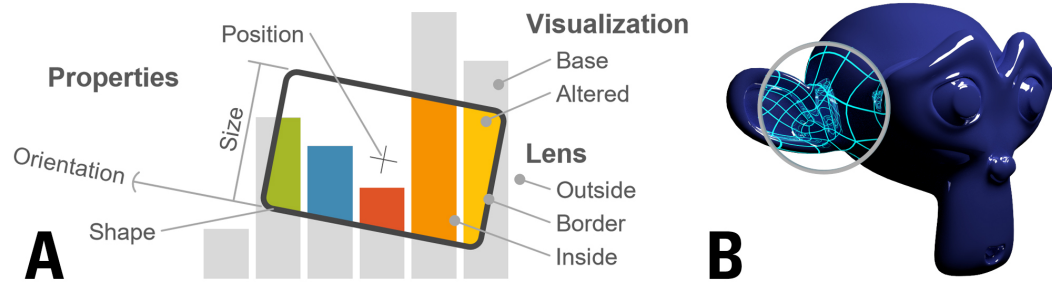


Abb. 2.15: A: Schematische Beschreibung einer Magic Lens von Tominski et al. [Tom+17]. B: Konzeptgrafik für eine Magic Lens zum Betrachten des Gittermodells eines 3D-Objekts. (Grafik erstellt in Blender [Fou])

Magic Lenses (z. Dt. „Magische Linsen“) sind ein interaktives Visualisierungskonzept, welches eine alternative Sicht auf den lokal von der Linse abgedeckten Bereich bietet. Hierdurch kann der Nutzer beispielsweise präzise nach Informationen filtern, Inhalte vergrößern, oder persönliche Sichten auf die Visualisierung erhalten. Obwohl eine überwiegende Anzahl der zugehörigen Publikationen zweidimensionale Darstellungen betrachten, lassen sich die Grundkonzepte dennoch auf 3D-Visualisierung adaptieren (siehe Abbildung 2.14).

Annotationen

Annotationen stellen die Integration zusätzlicher Informationen in eine Visualisierung dar und können das Verständnis fördern, sowie Zusammenhänge zwischen den zugrundeliegenden Daten kodieren. Hierbei kann grundlegend zwischen computergenerierten Annotationen (z.B. Labels oder Rohdaten) und nutzergenerierten Annotationen (z.B. Notizen oder Sketches) unterschieden werden. Bach et al. betrachten mit dem „AR-Canvas“ das Einbetten semantischer Informationen im Kontext einer immersiven AR-Applikation (siehe Abbildung 2.15) [Bac+17b]. Dabei variieren die integrierten Inhalte je nach Distanz des Nutzers zu bestimmten physikalischen Objekten in seiner realen Umgebung.



Abb. 2.16: Das „AR-Canvas“ von Bach et al. verwendet Annotationen um semantische Informationen in immersiven AR-Umgebungen zu kodieren [Bac+17a].

Visual Access Distortion

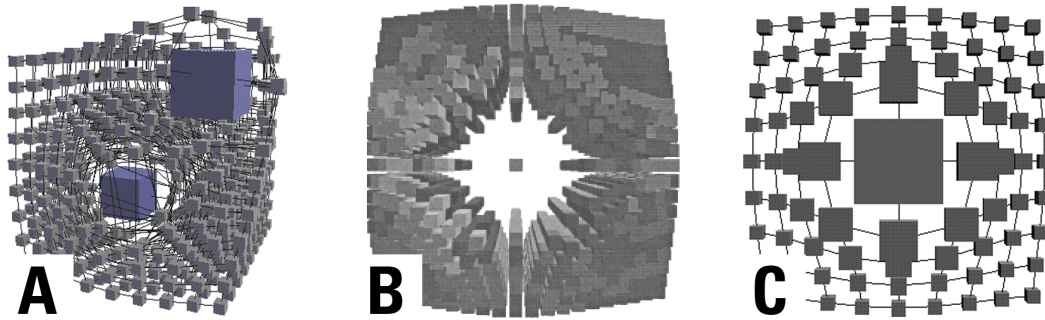


Abb. 2.17: A: Initiale Kozeptionierung von Visual Access Distortion von Cowpertwhaite et al. [Cow+96]. B:, C: Carpendale et al. griffen die Technik in weiteren Publikationen auf [CS96] [Car97].

Visual Access Distortion (z. Dt. „Verzerrung für visuellen Zugang“) bezeichnet eine Technik, um einzelne Datenobjekte innerhalb einer stark überlagerten Visualisierung (i.d.R. Graphen) zugänglicher zu machen. Dabei werden verzerrungsorientierte Visualisierungstechniken angewandt, die umgebende Datenobjekte von einem Verschiebungszentrum aus abstößt. Darüber hinaus kann simultan die Wahrnehmbarkeit des Objektes von Interesse durch visuelle Attribute (z.B. Skalierung o. Farbe) erhöht werden. Ursprünglich von Cowperthwaite et al. im Kontext eines 3D-Graphens erdacht, griffen Carpendale et al. dieses Konzept in einem ähnlichen Kontext auf (siehe Abbildung 2.16) [Cow+96] [CS96] [Car97].

Multiple and Coordinated Views (MCV)

Komplexe Analyse von Visualisierungen bedarf zwangsweise einer Veränderung der Sicht auf die dargestellten Daten. Durch Verwendung von *Multiple and Coordinated Views* (z. Dt. „Mehrere koordinierte Ansichten“) können simultan mehrere Ansichten eines Datensatzes präsentiert werden (siehe Abbildung 2.17).

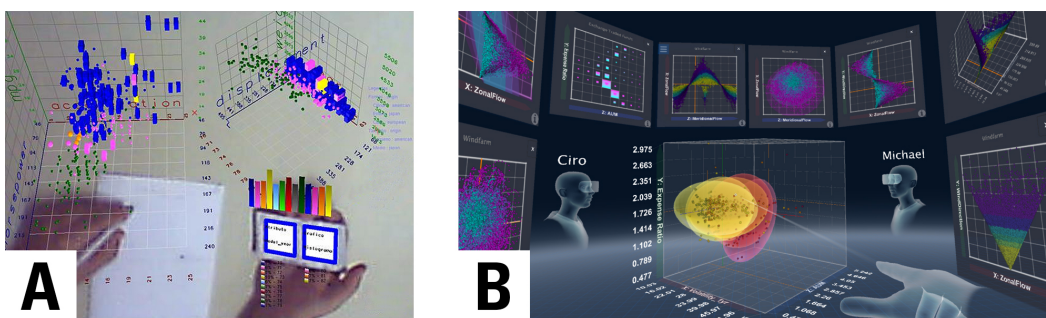


Abb. 2.18: A: DoCarmo et al. verknüpften bereits 2007 verschiedene InfoVis-Techniken im Kontext einer interaktiven AR-Applikation [Car+07]. B: „Virtualitics“ integriert hochinteraktive analytische Prozesse in einer immersiven VR-Umgebung [VI].

Scherr erörtert im Kontext von InfoVis, dass dabei die einzelnen Ansichten einer MCV miteinander in Verbindung stehen sollten, sodass Interaktion in einer View auch die Darstellung in anderen Views beeinflusst [Sch08]. Ursprünglich vorwiegend in Desktop-Systemen angewandt, ist dieses Konzept auch im Kontext immersiver AR- und VR-Umgebungen denkbar. DoCarmo et al. adaptierten MCV 2007 in Zusammenhang mit InfoVis in AR und „Virtualities“ verwenden diese Technik als Grundkonzept für ihre analytische VR-Umgebung (siehe Abbildung 2.17) [Car+07] [VI]. Chandler et al. betonen in dieser Hinsicht, dass eine Kombination von 2D- und 3D-Visualisierungen die Effektivität immersiver analytischer Systeme steigern kann [Cha+15]

Animation zeitabhängiger Datendimensionen

Multivariate Datensätze können häufig im Verlauf von Zeit betrachtet werden. Dabei wollen Nutzer i.d.R. Einsicht in die Entwicklung bestimmter Datendimensionen zwischen zwei Zeitpunkten nehmen, um beispielsweise Ausreißer, Trends oder Zyklen zu erkennen. Damit diese analytischen Prozesse unterstützt werden können, empfiehlt sich der Einsatz nachvollziehbarer „Animation zeitabhängiger Daten“. Brath wandte diese Thematik im Kontext räumlich abgetragener Datensätze an [Bra99] (siehe Abbildung 2.18).

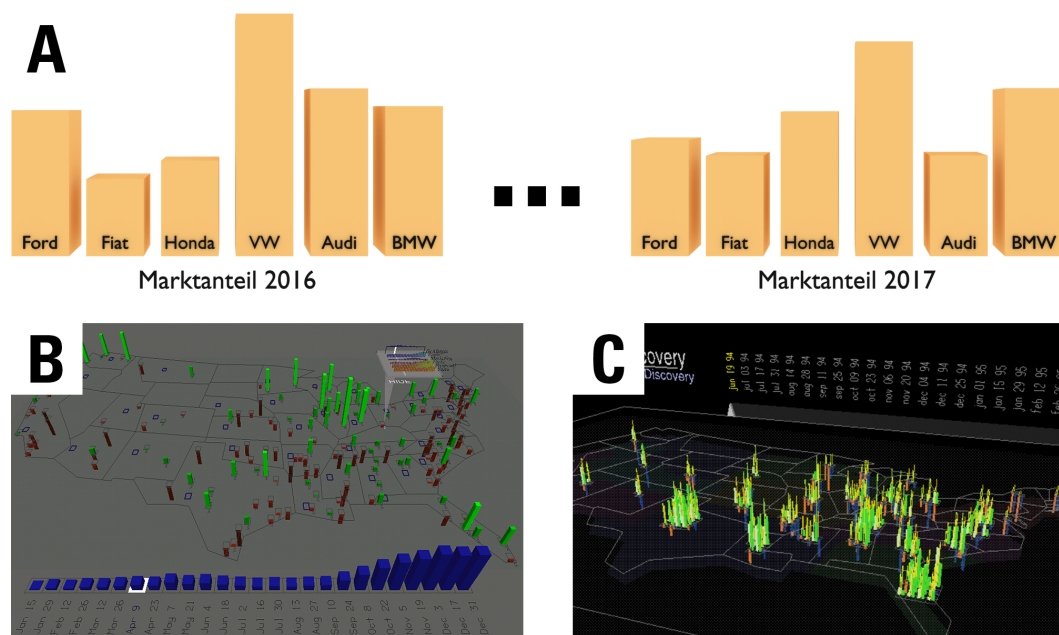


Abb. 2.19: A: Ein 3D-Balkendiagramm zu zwei verschiedenen Zeitpunkten. Ein nachvollziehbarer, animierter Übergang ist notwendig, um einen effektiven Vergleich der quantitativen Ausprägungen zu ermöglichen. (Grafik erstellt in Blender [Fou]) B:, C: Brath verwendet Animation zeitbasierter Daten, um die Entwicklung räumlich abgetragener Verkaufszahlen zu kommunizieren [Bra99].

2.4 Zusammenfassung

Initial wurde in diesem Kapitel das Potenzial aktueller technologischer Fortschritte im Kontext 3D-fähiger Ausgabemedien motiviert und eine Unterscheidung zwischen den Begriffen: *Mixed*, *Augmented* und *Virtual Reality* vorgenommen. Folgend wurde das bereits etablierte und gut erforschte Themengebiet der *Visual Analytics* vorgestellt, welches die Vorzüge automatischer Datenanalyse mit der Fähigkeit des Menschen zum Treffen komplexer Schlussfolgerungen kombiniert. Die aktuelle Forschung weist darauf hin, dass die überwiegende Anzahl an Applikationen in diesem Bereich für traditionelle Desktop-Umgebungen konzeptioniert sind. Das derzeit aufstrebende Forschungsgebiet der *Immersive Analytics* rückt die Grundkonzepte der *Visual Analytics* in den Kontext moderner Interaktions- und Darstellungsmedien und spezifiziert vielversprechende Szenarien für zukünftige Betrachtungen. *Zahlreiche Beispiel-Applikationen*, die Analyse von InfoVis in einer immersiven VR-/AR-Umgebung ermöglichen, konnten in diesem Zusammenhang identifiziert werden. Im Anschluss wurden 3D-Visualisierungen hinsichtlich der zugehörigen *Interaktionsaufgaben* untersucht und eine Klassifikation verschiedener *Werkzeuge* vorgenommen, welche die Analyse dieser Visualisierungen unterstützen.

Insgesamt weist die aktuelle Forschung darauf hin, dass mit zunehmender Fortentwicklung dreidimensionaler Ausgabegeräte das Interesse an analytischen Anwendungen in immersiven Umgebungen stark steigt. Da bestehende Konzepte für konventionelle Anwendungen nur bedingt in diesen modernen Kontext adaptiert werden können, besteht Bedarf an der Entwicklung neuartiger Interaktions- und Visualisierungskonzepte.

Konzept der Augmented Displays

Die Analyse verwandter Arbeiten hat gezeigt, dass mit zunehmenden technologischen Fortschritt 3D-fähiger Ausgabesysteme das Interesse der Anwendung von InfoVis im Kontext immersiver AR-/VR-Umgebungen steigt. Daraus resultiert die Erschließung neuer Themenfelder, wie das der *Immersive Analytics*, welches neuartige Möglichkeiten in Bezug auf Wahrnehmung und Umgang mit Informationsvisualisierung betrachtet. Trotz der relativ hohen Anzahl existierender Systeme dieser Kategorie (*siehe Kapitel 2.2.3 - Abbildung 2.8*), besteht aktuell Bedarf an der Entwicklung grundlegender Konzepte. Bach et al. halten beispielsweise fest, dass eine große Distanz zwischen Darstellungs- und Interaktionsraum im Kontext immersiver Umgebungen die Nutzerperformance stark negativ beeinträchtigen kann [Bac+17b]. Insbesondere die direkte Interaktion mit Datenobjekten stellt dabei nach Chandler et al. eine nicht zu vernachlässigende Herausforderung dar [Cha+15].

Im Folgenden wird zunächst die Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs motiviert und auf Basis dessen das Konzept von Reipschläger's und Dachsel's „Augmented Displays“ (unpubliziert) erörtert [Rei18]. Dieses dient als Rahmenkonzept für die anschließende Konzeption in Kapitel 4.

3.1 Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs

Die überwiegende Anzahl existierender Applikationen zur Analyse von InfoVis in immersiven Umgebungen bedient sich fast ausschließlich der Eingabemodalitäten: Controller-, Blick-, Sprach- oder Freihandgestensteuerung (*siehe Kapitel 2.2.3 - Abbildung 2.8*). Während die Verwendung dieser gängigen Optionen im Kontext von AR/VR schlüssig erscheint, wird der Einsatz von Touch-Eingabe in solchen Umgebungen oftmals nur theoretisch in Erwägung gezogen. Subjektiv betrachtet ist dieser Status nachvollziehbar, da bei Verwendung von Touch als reine Eingabemodalität in AR und VR eine große Distanz zwischen Darstellungs- und Interaktionsraum besteht. Bach et al. halten in diesem Zusammenhang fest, dass es zum vollständigen Abbilden aller Freiheitsgrade in einem interaktiven System einer äquivalenten Anzahl räumlicher und interaktiver Dimensionen bedarf [Bac+17b]. Bei der Verwendung von Touch (2D) zur Manipulation von AR (3D), besteht beispielsweise eine solche abstrahierende Distanz.

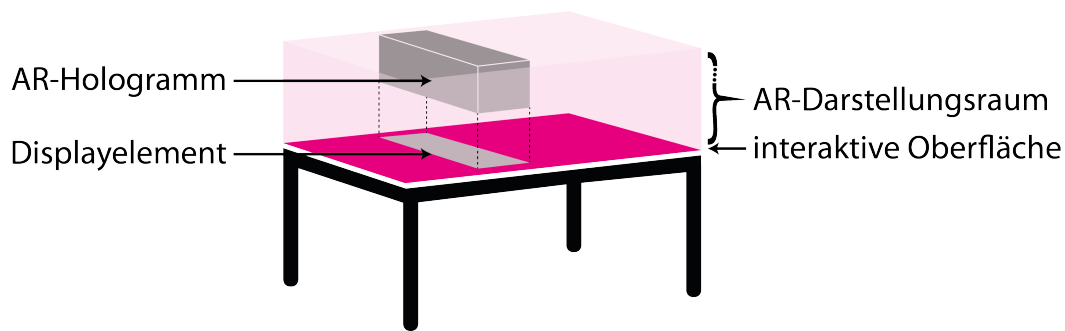


Abb. 3.1: Die Systeme der: interaktiven Oberfläche und des AR-HMDs stehen durch Relationen der beinhalteten Entitäten miteinander in direkter Verbindung.

Eine mögliche Lösung dieser inkompatibel erscheinenden Kombination stellen Reipschläger's und Dachsel's „Augmented Displays“ (unpubliziert) dar [Rei18]. Die Forscher betrachten anstatt der Manipulation von AR-Umgebungen mit interaktiven Oberflächen vielmehr die Erweiterung interaktiver Oberflächen durch AR (siehe Abbildung 3.1) [Rei18]. Dabei definiert das übergeordnete Konzept, dass die auf der interaktiven Oberfläche dargestellten Inhalte, den primären Rahmen für die mittels HMD projizierten AR-Hologramme bietet. Interaktive Oberflächen sind durch zweidimensionale Darstellungs- und Interaktionsmodalitäten charakterisiert, die sich insbesondere zur Repräsentation textueller Informationen und Rohdatensätzen, sowie manipulativer UI-Elemente eignet. Augmented Reality HMDs bieten hingegen eine geeignete Plattform zur immersiven Darstellung und Exploration von 3D-Visualisierungen. Der konzeptionelle Rahmen in diesem Kapitel betrachtet daher die ergänzende Verschmelzung der jeweiligen Modalitäten dieser beiden Domänen (siehe Abbildung 3.2), um im Anschluss in Kapitel 4 eine interaktive und immersive Analyse-Umgebung für 3D-InfoVis zu erschaffen.

	Interaktive Oberfläche	Augmented Reality HMD
Rolle	Kontextgebend Öffentliche Ansicht	Kontexterweiternd Private, personalisierbare Ansicht
Darstellung	nicht-stereoskopisch 2D-UI-Elemente Textuelle Informationen	stereoskopisch 3D-Visualisierungen Zusätzliche Dimensionen kodierbar
Interaktion	präzise manipulative, konfigurative und analytische Interaktion	Immersive, physikalische Navigation Exploration von 3D-Visualisierungen

Abb. 3.2: Überblick über die Rolle, Darstellungs- und Interaktionszuständigkeiten von interaktiven Oberflächen und Augmented Reality im Rahmen von „Augmented Displays“.

3.2 Komponenten des Konzepts

Durch Kombination *interaktiver Oberflächen* mit *AR-HMDs* ergeben sich verschiedene Dimensionen zum Verknüpfen dieser beiden Systeme. Im Folgenden werden die dabei betrachteten Systeme, Entitäten und Relationen definiert.

3.2.1 Systeme und enthaltene Entitäten

Grundlegend wird zwischen dem System der *interaktiven Oberfläche* und dem des *AR-HMDs* unterschieden. Die interaktive Oberfläche definiert eine planare Darstellungs- und Interaktionsschnittstelle, welche *Displayelemente* als Entität beinhaltet. AR-HMDs eröffnen hingegen einen dreidimensionalen Darstellungs- und Interaktionsraum, welcher die limitierten Darstellungskapazitäten der interaktiven Oberfläche erweitert. In diesem Raum werden *AR-Hologramme* repräsentiert, welche i.d.R. einen direkten Bezug zu einem Displayelement besitzen. Reipschläger und Dachsel identifizieren in ihrer unpublizierten Arbeit in dieser Hinsicht, dass AR-Hologramme folgende vier Rollen (*siehe Abbildung 3.3*) einnehmen können [Rei18]:

Hologramm-Rolle	Beschreibung
Primär	Durch Repräsentation einer speziellen Ansicht wird der Fokus von der interaktiven Oberfläche entzogen und auf die Augmented Reality gelenkt.
Sekundär	Durch Bereitstellung zusätzlicher visueller Dimensionen oder Werkzeuge wird das Displayelement angereichert, wobei der Fokus auf der interaktiven Oberfläche verweilt.
Unterstützend	Kodierung einfacher Hilfsattribute, wie z.B. Relationen zwischen einem Displayelement und AR-Hologrammen.
Nahtlos	Nicht unterscheidbares Verschmelzen eines AR-Hologramms mit einem Displayelement.

3.2.2 Relation zwischen Systemen und Entitäten

Ein wesentlicher Aspekt des Konzepts ist es, dass die interaktive Oberfläche als primäre Darstellungs- und Interaktionsschnittstelle bei der Kombination mit AR-HMDs fungiert. Daraus resultiert, dass sämtliche Entitäten (Hologramme) der Augmented Reality stets in direktem Bezug zu jeweils einem Displayelement stehen. Darüber hinaus besteht eine wechselseitige Kopplung der räumlichen Positionierung und Interaktion zwischen Displayelementen und AR-Hologrammen. Der Darstellungsraum der Augmented Reality kann potenziell auf den Raum über/vor der interaktiven Oberfläche begrenzt werden (*siehe Abbildung 3.1*), um somit den Zusammenhang zwischen einem Displayelement und AR-Hologrammen durch räumliche Nähe zu kodieren.

Konzepte zur Unterstützung analytischer Prozesse im Umgang mit 3D-InfoVis bei Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs

Im vorherigen Kapitel wurde Reipschläger's und Dachsel's Konzept der „Augmented Displays“ (unpubliziert) erörtert, welches im Kern die Kombination interaktiver Oberflächen (z.B. Tabletops oder Tablets) mit AR-HMDs zur Anreicherung der dargestellten Inhalte definiert [Rei18]. Im Folgenden wird dieses Rahmenkonzept im Kontext der Analyse von 3D-InfoVis betrachtet. Dafür werden zunächst die Vorteile von „Augmented Displays“ erörtert, verschiedene Interaktionsaufgaben generalisiert, Interaktionsabläufe spezifiziert, Benutzerschnittstellen definiert, die Eignung verschiedener InfoVis-Techniken diskutiert, sowie grundlegende Interaktionstechniken und Werkzeuge zur Unterstützung analytischer Prozesse konzipiert. Die daraus resultierenden Konzepte adressieren in ihrem Kern Limitationen, die bei Darstellung und Interaktion von und mit 3D-InfoVis in konventionellen Systemen bestehen und im Rahmen der im vorherigen Kapitel erläuterten Systemkonstellation gelöst oder wesentlich angereichert werden können. Um komplexe Abläufe von Interaktionen und damit konkrete Analyse-Prozesse zu unterstützen, sollen die dabei entwickelten Konzepte und Interaktionstechniken möglichst flexibel und kombinierbar sein.

4.1 Vorteile des „Augmented Displays“-Konzepts

Durch Symbiose nicht-stereoskopischer interaktiver Oberflächen und stereoskopischer AR-HMDs ergibt sich das Verschmelzen der Vorteile, sowie das Überkommen der Limitationen der jeweiligen Systeme. Während sich interaktive Oberflächen insbesondere zur Darstellung des Rohdatensatzes, sowie präziser manipulativer Interaktion eignen, ist Augmented Reality zur Kodierung und Exploration immersiver, dreidimensionaler InfoVis befähigt. Hierdurch werden gezielt jene Inhalte von der interaktiven Oberfläche ausgelagert, deren Darstellung ohnehin im planaren Kontext limitiert wäre. Durch die physische Nähe, der auf der interaktiven Oberfläche dargestellten Displayelemente und der AR-Hologramme, besteht zusätzlich eine geringe Distanz zwischen Interaktions- und Darstellungsraum. Dies löst gleichzeitig eine wesentliche Herausforderung im Kontext von AR-Applikationen — die Interaktion mit Datenobjekten aus der Ferne. Üblicherweise muss dafür auf limitierte Eingabemodalitäten, wie: Blick-, Sprach- oder Freihandgestensteuerung, als auch auf unintuitive Interaktions-


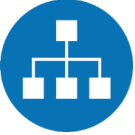

techniken oder verschachtelte Benutzerschnittstellen zurückgegriffen werden. Im Gegensatz dazu entfällt dieser Aspekt fast vollständig bei Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs, da der Nutzer sich zum Interagieren mit dem touchfähigen Display ohnehin in unmittelbarer physischer Nähe zu diesem befindet. Darüber hinaus wird die begrenzte Darstellungskapazität der interaktiven Oberfläche durch AR erweitert und eine Möglichkeit für individualisierbare Schnittstellen, sowie persönliche und private Views bereitgestellt. Dies eröffnet insbesondere Potenzial für kollaborative Anwendungsfälle.

4.2 Aufgaben, Abläufe und Benutzerschnittstellen

4.2.1 Generalisierte Interaktionsaufgaben

In Kapitel 2.3.1 wurde bereits ein Überblick über wesentliche Grundaufgaben-Taxonomien im Kontext von 3D-InfoVis gegeben. Die einzelnen Klassifikationsschemata fundamentieren dabei auf: interaktiven, analytischen und kognitiven Betrachtungsperspektiven. Im Folgenden werden die verschiedenen identifizierten Grundaufgaben in Hinblick auf den Kontext der Analyse von 3D-InfoVis bei Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs eingeordnet.

Als Grundparadigma der Interaktion ist in dieser Systemkonstellation „Shneiderman's Mantra“ „Overview first, zoom and filter; then details-on-demand“ gültig [Shn96]. Die Interaktion lässt sich dabei in die drei Aufgabenkategorien: *Konfiguration*, *Verwaltung* und *analytische Untersuchung* von Informationsvisualisierungen gliedern.

Aufgabenkategorie		Zugehörige Grundaufgaben
	Konfiguration Initialer Aufbau und Parametrisierung der Informationsvisualisierung.	<ul style="list-style-type: none"> – Auswahl der zu kodierenden Datendimensionen – Auswahl der Visualisierungs-Technik – Abbilden der ausgewählten Datendimensionen auf visuelle und räumliche Attribute – Rekonfiguration existierender Visualisierungen
	Verwaltung Organisation und Wechsel zwischen existierenden Informationsvisualisierungen.	<ul style="list-style-type: none"> – Wechsel zwischen verschiedenen existierenden Visualisierungen – Entfernen von Visualisierungen – Strukturelles Verketteten mehrerer Visualisierungen
	Analytische Untersuchung Analytisches Untersuchen der Informationsvisualisierung in Hinblick auf verschiedene Fragestellungen.	<ul style="list-style-type: none"> – Amar et al. Low-Level-Tasks [Ama+05]: <i>Werte einsehen, Filtern, Berechnen, Extremwert finden, Sortieren, Intervall bestimmen, Verteilung charakterisieren, Anomalien finden, Clustern und Korrelieren</i>

Durch diese Aufgabenkategorien ergeben sich zwei wesentliche Ansichten für die interaktive Oberfläche: eine *konfigurative Ansicht* zum Erstellen der InfoVis und eine *analytische Ansicht* zum Untersuchen der InfoVis in Hinblick auf verschiedene analytische Fragestellungen (*nähere Erläuterung in Kapitel 4.2.3*). Die Aufgabenkategorie der *Verwaltung* ist dabei omnipräsent in den beiden zuvor erwähnten Ansichten integriert.

4.2.2 Interaktionsabläufe zur Umsetzung der Grundaufgaben

Im vorherigen Abschnitt wurden in Hinblick auf den Umgang mit 3D-InfoVis drei wesentliche Aufgabenkategorien generalisiert: *Konfiguration*, *Verwaltung* und *analytische Untersuchung*. Im Folgenden werden Interaktionsabläufe zur Umsetzung dieser Bereiche spezifiziert. Die interaktive Oberfläche stellt dabei die dominante Eingabeform dar, da diese neben präziserer Interaktion auch physisch weniger anspruchsvoll ist, als beispielsweise: Freihandgesten-, Blick- oder Sprachsteuerung. Das Verändern der Ansicht auf die InfoVis erfolgt insbesondere mittels der durch AR-HMDs realisierten, egozentrischen physikalischen Navigationstechniken. Ziel ist es schnelle und intuitive Interaktionsabläufe bereitzustellen, welche geringen kognitiven Aufwand für die Aufgabenkategorie der *Konfiguration* und *Verwaltung* benötigen, sodass der Anwender seine mentale Aufmerksamkeit auf die *analytische Untersuchung* fokussieren kann.

Datensätze enthalten üblicherweise Datenfelder (auch: Datendimensionen) unterschiedlichen Datentyps. In Hinblick auf die Erstellung interaktiver InfoVis ist daher eine feingranulare Klassifikation der Datenfelder in verschiedene Rollen hilfreich.

Grundlegende Rollen von Datendimensionen		
	Textuell	Nicht-kategorische Zeichenfolgen, welche i.d.R. als Label/Bezeichner dienen.
	Numerisch	Quantitative Ausprägungen wie z.B. Ganzzahlen oder Dezimalzahlen.
	Kategorisch	Nominale oder Ordinale Ausprägungen zur Klassifikation von Datenobjekten.
	Temporal	Zeitbasierte Daten wie Datum & Uhrzeit oder einer Zeitdauer.
	Geografisch	Kodierung geografischer Positionen z.B. in Form von direkten Koordinaten oder koordinatenabhängigen Attributen wie z.B. Städtenamen.
	Relational	Kodierung einer strukturellen Beziehung zu einem anderen Datenobjekt z.B. in hierarchischem Zusammenhang.

Konfiguration der InfoVis

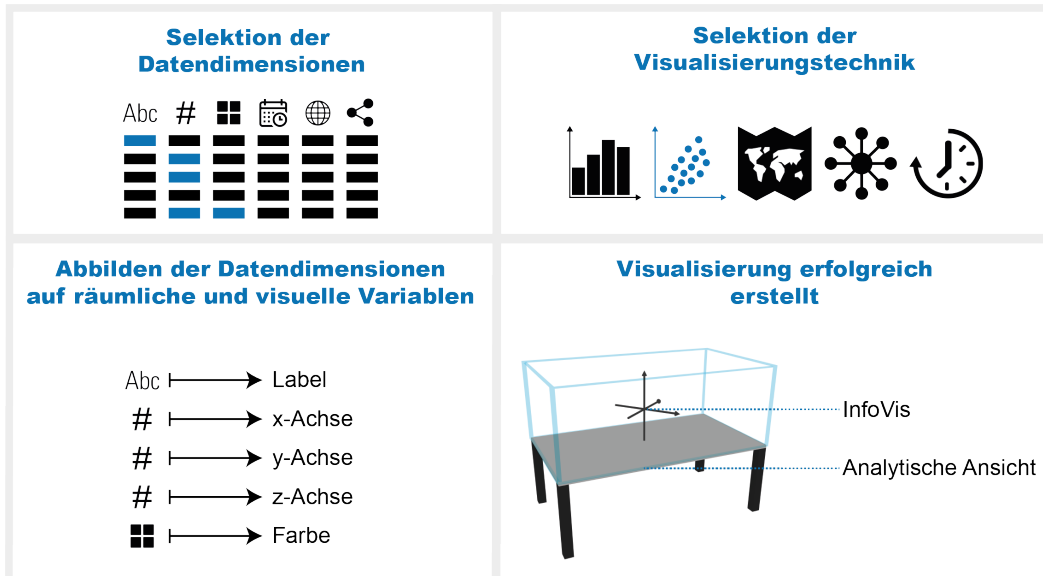


Abb. 4.1: Die einzelnen Schritte zur Konfiguration einer InfoVis. Nach Abschluss dieses Vorgangs stellt die interaktive Oberfläche eine analytische Ansicht für die im AR-Darstellungsraum kodierte Informationsvisualisierung bereit.

Die *Konfiguration* einer InfoVis stellt den ersten Schritt im Interaktionskontext dar (siehe *Abbildung 4.1*). Dabei wird ein abstrakter Datensatz computergestützt in eine visuelle Erscheinungsform übertragen. Dies beinhaltet: die Selektion, der zu kodierenden Datendimensionen, die Auswahl der InfoVis-Technik, das Abbilden der ausgewählten Datendimensionen auf visuelle und räumliche Variablen, sowie die optionale Rekonfiguration existierender Informationsvisualisierungen (z.B. durch Neuabbildung der Datendimensionen).

Die Auswahl der zu kodierenden Datendimensionen stellt die erste Teilinteraktion zur initialen Konfiguration einer InfoVis dar. Ein Datenfeld (z.B. Spalte in einer Tabelle) charakterisiert dabei eine konkrete Dimension des Datensatzes und kann automatisiert oder manuell in die zuvor definierten, grundlegenden Rollen klassifiziert werden. Nach erfolgreicher Klassifikation werden die Datendimensionen dem Nutzer in Form von Übersichten (z.B. Liste o. Tabelle) auf der interaktiven Oberfläche repräsentiert, aus welchen die visuell zu Kodierenden selektiert werden können.

Die InfoVis-Technik stellt das Modell zur Übersetzung abstrakter Informationen in eine visuelle Erscheinungsform dar. Die Eignung einer jeweiligen Visualisierungstechnik zur Repräsentation eines Datensatzes hängt stark von den zugrundeliegenden Rollen der einzelnen Datendimensionen ab (siehe *Kapitel 4.3*). Während Balkendiagramme beispielsweise Datendimensionen in numerischer und kategorischer Rolle kodieren können, ist diese InfoVis-Technik nicht zur Repräsentation geografischer Attribute zweckdienlich. Daher kann das konfigurative System der interaktiven Oberfläche dem Nutzer auf Basis der zuvor selektierten Datendimensionen konkrete Vorschläge für geeignete Visualisierungstechniken anbieten.

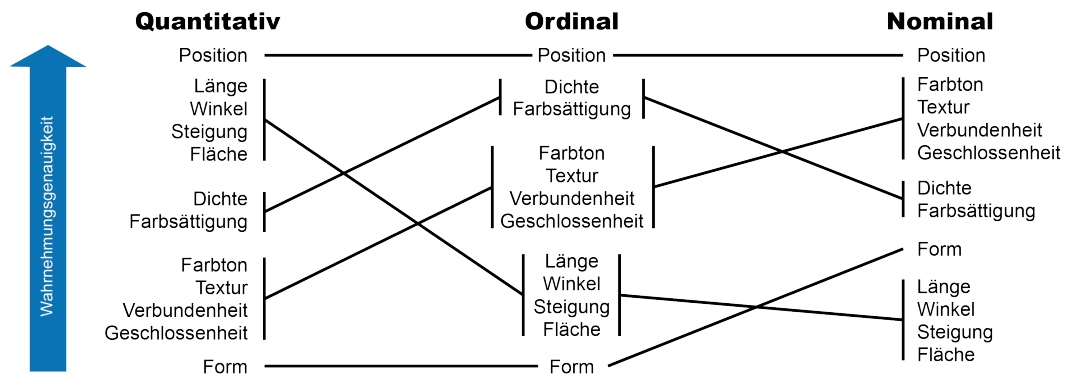


Abb. 4.2: Das Mackinlay-Ranking beschreibt die Eignung räumlicher und visueller Variablen zur Kodierung quantitativer, ordinaler und nominaler Daten [Mac88].

Nach Selektion der InfoVis-Technik erfolgt das Abbilden der zuvor ausgewählten Datendimensionen auf visuelle und räumliche Variablen. Diese haben dabei eine unterschiedliche Eignung hinsichtlich der Kodierungsfähigkeit qualitativer und quantitativer Datentypen (siehe Abbildung 4.2). Nachdem genügend Datendimensionen entsprechend der Anforderungen der jeweiligen Visualisierungstechnik abgebildet wurden, wird diese in Form eines AR-Holograms im AR-Darstellungsraum über der interaktiven Oberfläche projiziert. Ab diesem Zeitpunkt besteht eine direkte informationelle und räumliche Relation zwischen dem AR-Hologramm und der zugehörigen analytischen Ansicht auf der interaktiven Oberfläche. Um die InfoVis zur Laufzeit gemäß der analytischen Fragestellungen des Nutzers zu adaptieren, kann dieser nachträglich die kodierten Datendimensionen austauschen oder die Abbildung dieser anpassen.

Verwaltung der erstellten Informationsvisualisierungen

Da der Nutzer über die konfigurative Funktionalität der interaktiven Oberfläche mehrere Informationsvisualisierungen erstellen kann und jede dieser eine individuelle analytische Ansicht besitzt, bedarf es an Abläufen zur *Organisation und Wechsel zwischen existierenden Informationsvisualisierungen*. In Vorbereitung auf die analytische Untersuchung ist darüber hinaus das *strukturelle Verketteten* mehrerer Informationsvisualisierungen eine Teilaufgabe dieser Kategorie. Dies hat die zugrundeliegende Motivation, dass das Ergebnis einer analytischen Untersuchung oftmals als Basis für eine daran anknüpfende analytische Untersuchung dient. Eine nähere Erläuterung dieses Konzepts erfolgt in Kapitel 4.4.1.

Analytische Untersuchung

Im Kontext von InfoVis ist die Intention des Nutzers aus einer visuellen Repräsentation eines abstrakten Datensatzes konkrete Einsichten und Erkenntnisse zu generieren. Die *analytische Untersuchung* stellt dabei das fundamentale Mittel zum Erschließen neuen Wissens über die Daten dar. Hierfür werden Möglichkeiten zur direkten Manipulation der Datenobjekte benötigt. Um analytische Grundaufgaben (wie von Amar et al. - siehe Kapitel 2.3.1 [Ama+05]) zu realisieren, bedarf es Visualisierungstechnik-spezifischer Interaktionsschnittstellen. Diese werden in Kapitel 4.4 und 4.5 unter dem Gesichtspunkt: „Grundlegende Konzepte und Werkzeuge zur Unterstützung analytischer Prozesse im Umgang mit 3D-InfoVis“ konzipiert.

4.2.3 Benutzerschnittstellen

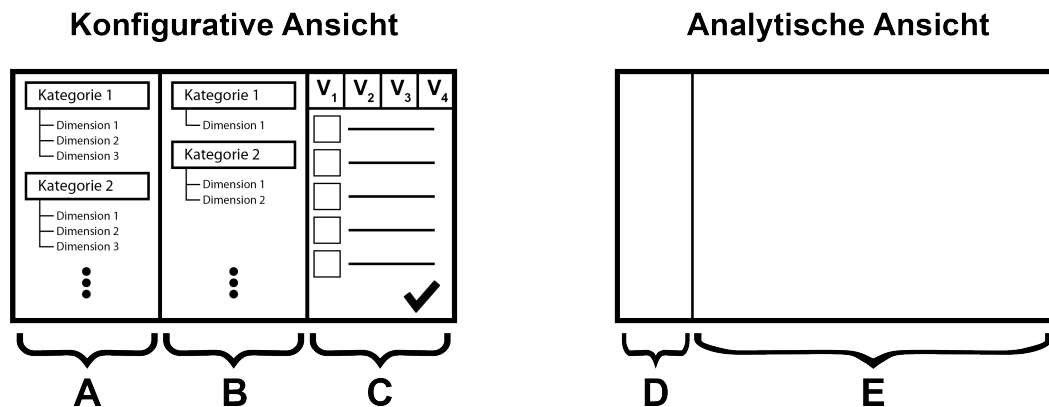


Abb. 4.3: Struktur der *konfigurativen* und *analytischen* Ansichten, welche auf der interaktiven Oberfläche bereitgestellt werden.

Die interaktive Oberfläche stellt im wesentlichen zwei Benutzerschnittstellen bereit: die *konfigurative Ansicht* zur initialen Selektion der Datendimensionen und Erstellen der InfoVis und die *analytische Ansicht* zur Untersuchung der erstellten InfoVis mittels verschiedener Interaktionstechniken und Werkzeuge (siehe Abbildung 4.3). Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes werden die Struktur und zugrundeliegende Konzepte dieser beiden Benutzerschnittstellen erörtert.

Die *konfigurative Ansicht* ist in drei Teilbereiche gegliedert, welche sequentiell aufeinander aufbauen. **A:** stellt eine Übersicht aller im Datensatz enthaltenen Datenfelder dar. Diese werden entsprechend der in Kapitel 4.2.2 definierten Rollen kategorisiert und aufgelistet. Der Nutzer kann Datendimensionen mittels eines Taps oder einer Drag-and-Drop-Geste selektieren. **B:** stellt eine Übersicht aller im vorherigen Teilbereich selektierten Datendimensionen dar und verwendet dabei eine analoge Übersichtsdarstellung wie in Teilbereich A. **C:** beinhaltet im oberen Bereich Buttons zur Auswahl der InfoVis-Technik und unterhalb dieser eine Auflistung sämtlicher zugehöriger und kodierbarer Rollen in Form von Slots. Durch Drag-and-Drop einer in Teilbereich A oder B aufgelisteten, selektierten Datendimension auf einen Slot in Teilbereich C, erfolgt die Abbildung dieser Datendimension auf die entsprechende räumliche oder visuelle Variable der ausgewählten InfoVis-Technik. Insofern die Mindestanzahl an Abbildungen in Hinblick auf die Visualisierungstechnik erfolgt ist, kann der Nutzer die Erstellung der Informationsvisualisierung durch Tap auf den Haken in der unteren rechten Ecke von Teilbereich C abschließen.

Die *analytische Ansicht* ist in zwei Teilbereiche untergliedert. **D:** beinhaltet dabei die analytischen Werkzeuge ohne räumlichen Bezug und **E:** die mit räumlichen Bezug zur zugehörigen InfoVis (nähere Definition des räumlichen Bezugs in Kapitel 4.5.1). Da die InfoVis in dem Raum über Teilbereich E verortet ist, vereinnahmt E den Großteil dieser Ansicht. Hierdurch können die Informationsvisualisierungen, sowie die zugehörigen analytischen Werkzeuge mit räumlichen Bezug ein größtmögliches Potenzial hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit und Bedienbarkeit entfalten.

4.3 Geeignete InfoVis-Techniken

In Kapitel 2.2.3 wurde bereits ein Überblick über verschiedene Anwendungen von InfoVis im Kontext immersiver AR-/VR-Umgebungen gegeben. Eine InfoVis-Technik definiert dabei das Modell zur Übersetzung abstrakter Informationen in eine visuelle Erscheinungsform. Hinsichtlich der in 4.2.2 definierten Rollen von Datendimensionen hat jede InfoVis-Technik eine unterschiedliche Eignung zur Kodierung dieser Rollen und kann somit auch in Hinblick auf verschiedene analytische Fragestellungen verwendet werden.

In Vorbereitung auf die Konzeption grundlegender Interaktionstechniken und Werkzeugen zur Analyse von InfoVis, im Rahmen der zuvor erörterten Systemkonstellation, werden im Folgenden wesentliche InfoVis-Techniken in generalisierter Form vorgestellt. Dabei erfolgt eine Unterscheidung von vier wesentlichen Kategorien hinsichtlich der primär kodierbaren Datentypen. Die erste Kategorie betrachtet die Repräsentation *multivariater Datensätze*, welche vorwiegend Daten in rein numerischer oder kategorischer Form beinhalten. Eine zweite Kategorie stellen Visualisierungstechniken zur Abbildung von *Relationen* dar, indem primär hierarchische Zusammenhänge und Beziehungen zwischen Datenobjekten kodiert werden. *Geografische Daten* können in der dritten Kategorie durch Karten-Visualisierungen mit Verknüpfung zusätzlicher Visualisierungsebenen räumlich verortete numerische Ausprägungen repräsentieren. Die vierte Kategorie untersuchter InfoVis-Techniken stellt *zeitbasierte Daten* dar. Für den Kontext der Darstellung in Augmented Reality erfolgt hierfür die Konzeption einer Visualisierungstechnik, welche die Untersuchung der Entwicklung numerischer und kategorischer Attribute über einen bestimmten Zeitraum erlaubt.

4.3.1 Repräsentation multivariater Daten

Verschiedene Datenkomplexitäten (z.B.: Uni-, Bi- und Multivariat) und Datentypen (Qualitativ oder Quantitativ) stellen unterschiedliche Anforderungen an jeweilige Visualisierungstechniken. Zur Repräsentation eines aus vorwiegend numerischen und kategorischen Rollen zusammengesetzten Datensatzes in AR eignen sich Infovis-Techniken wie: *Balkendiagramme*, *Streudiagramme*, *Parallele Koordinaten* oder *Netzdiagramme*. Diese Ansätze können sowohl in zweidimensionaler, als auch in dreidimensionaler Darstellungsform in Augmented Reality bereitgestellt werden. Wohingegen die Repräsentation von 3D-Visualisierungen auf konventionellen Displays gewissen Limitationen wie Verdeckung und perspektivischen Fehlinterpretationen unterliegt, können AR-HMDs durch die natürliche und egozentrische Perspektive diese Einschränkungen im Wesentlichen überkommen.

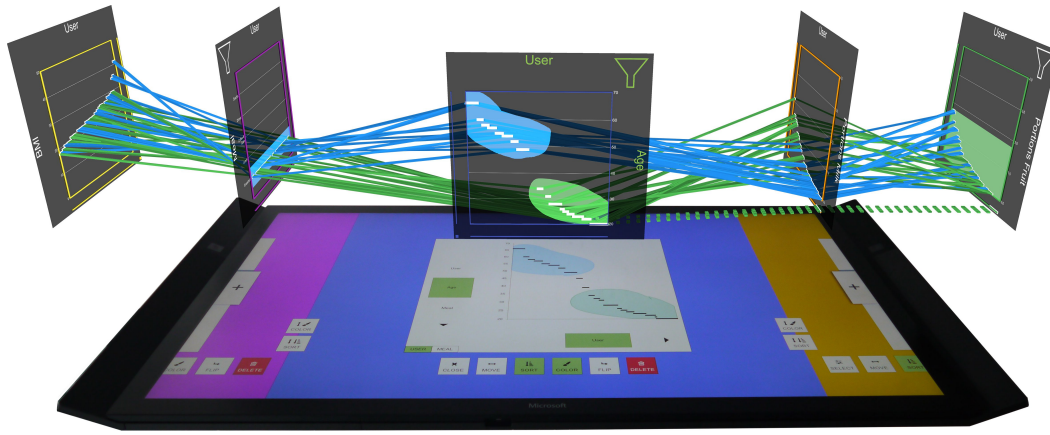






Abb. 4.4: Verwendung einer dreidimensionalen Parallelen Koordinaten Darstellung in Butscher et. al.'s „ART“-System [But+18].

Während Balkendiagramme und Streudiagramme primär zur Kodierung numerischer Rollen dienlich sind, können Parallele Koordinaten und Netzdiagramme gleichermaßen quantitative und qualitative Datentypen kommunizieren. Entlang der Achsen der jeweiligen Visualisierungstechniken können räumliche und in den Datenobjekten selber visuelle Variablen abgetragen werden. Streudiagramme und Parallele Koordinaten können darüber hinaus in mehreren Instanzen einer zweidimensionalen Visualisierung aneinander gereiht werden, wobei die Datenobjekte zwischen diesen Instanzen räumlich-relational z.B. mit Linien verknüpft werden (siehe Abbildung 4.4).

Visualisierungstechnik	Kodierbare Rollen von Datendimensionen
 <p>Balkendiagramme Überblick über Ausprägung und Verteilung.</p>	<p>Balkenhöhe \mapsto numerisch / temporal Datenobjektfarbe \mapsto kategorisch</p>
 <p>Streudiagramme Korrelationen aus Datenobjekt-Muster erkennen.</p>	<p>x-Achse \mapsto numerisch / temporal y-Achse \mapsto numerisch / temporal z-Achse \mapsto numerisch / temporal Datenobjektfarbe \mapsto kategorisch Datenobjektgröße \mapsto numerisch</p>
 <p>Parallele Koordinaten Attributsichtbarkeit/ Vergleichbarkeit Beliebig viele Achsen</p>	<p>Jede Achse \mapsto numerisch / temporal / kategorisch Datenobjektfarbe \mapsto kategorisch</p>
 <p>Netzdiagramme Objektsichtbarkeit/ Vergleichbarkeit Beliebig viele Achsen</p>	<p>Jede Achse \mapsto numerisch / temporal / kategorisch Datenobjektfarbe \mapsto kategorisch</p>

4.3.2 Repräsentation von Relationen

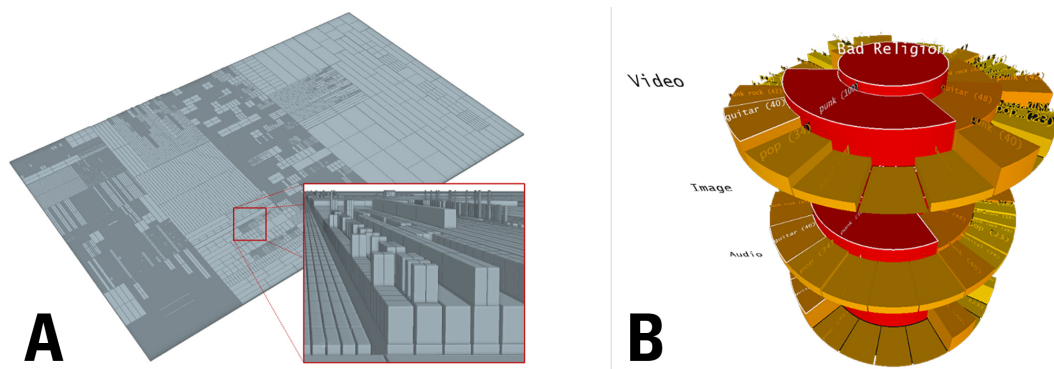





Abb. 4.5: A: 3D-Treemap von Schedl et al. [Sch+07]. B: 3D-Sunburst-Visualisierung von Trapp et al. [Tra+13].

Relationen werden in InfoVis überwiegend in Graph-Visualisierungen wie z.B. *Knoten-Kanten-Graphen*, *Flächenfüllenden Verschachtelungen* oder *Geschichteten Ansätzen* kodiert. Dreidimensionale Knoten-Kanten-Graphen fanden bereits Anwendung im Rahmen von Kwong et al.'s und Zhang et al.'s Untersuchungen [Kwo+16] [Zha+16]. Allerdings stellt das Layouting des Graphen, sowie die präzise Interaktion und Manipulation von einzelnen Knoten und Kanten in immersiven Umgebungen eine große Herausforderung in Hinblick auf die Eingabemodalitäten von VR und AR dar. Flächenfüllende Verschachtelungen (z.B. Treemap) und Geschichtete Ansätze (z.B. Sunburst) können neben hierarchischen Zusammenhängen prinzipiell auch zusätzliche numerische Attribute durch dreidimensionale Volumen kodieren, wie beispielsweise Trapp et al. und Schedl et al. untersuchten (*siehe Abbildung 4.5*) [Tra+13] [Sch+07]. Im Kontext immersiver AR-/VR-Umgebungen unterliegen diese Formen der 3D-Visualisierung allerdings ähnlichen Problemen wie dreidimensionale Knoten-Kanten-Graphen bezüglich der Interaktion mit Datenobjekten und Manipulation der Visualisierung durch natürliche Interaktion.

Visualisierungstechnik	Kodierbare Rollen von Datendimensionen
 Knoten-Kanten-Graphen Verknüpfen von Datenobjekten mit gerichteten, ungerichteten, gewichteten und ungewichteten Kanten.	Datenobjektgröße \mapsto numerisch Datenobjektfarbe \mapsto kategorisch Kanten \mapsto relational
 Flächenfüllende Verschachtelungen Struktur durch räumliche Eingrenzung. Hierarchie als raumfüllendes Layout.	Hierarchie \mapsto relational Datenobjektgröße \mapsto numerisch Datenobjektvolumen \mapsto numerisch Datenobjektfarbe \mapsto kategorisch
 Geschichtete Ansätze Deutung der Baumstruktur durch Schichtung, Adjazenz und Ausrichtung.	Hierarchie \mapsto relational Datenobjektgröße \mapsto numerisch Datenobjektvolumen \mapsto numerisch Datenobjektfarbe \mapsto kategorisch

4.3.3 Repräsentation geografischer Daten

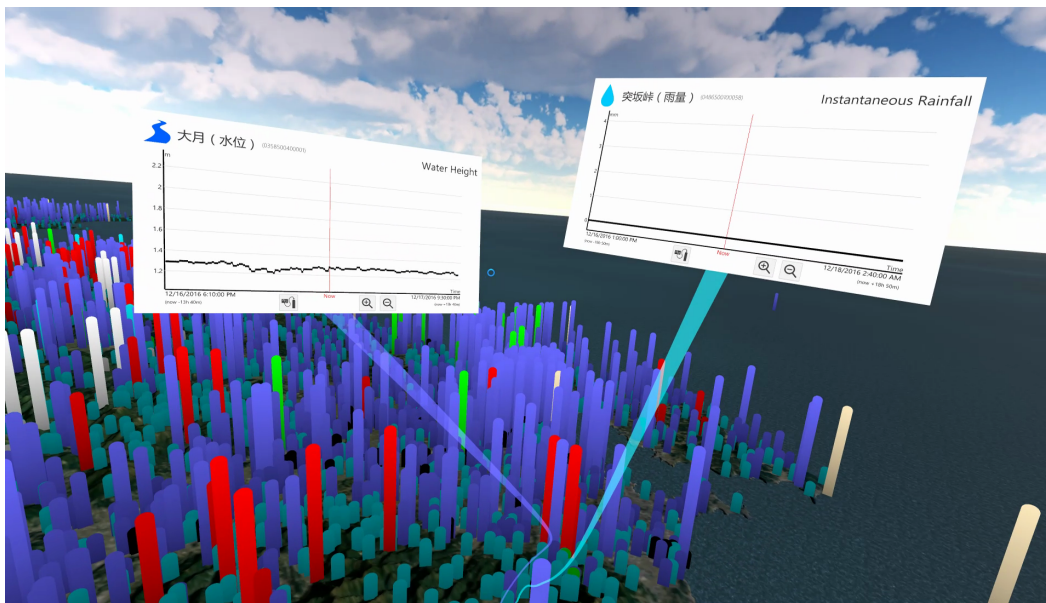



Abb. 4.6: Ready et al. verwenden eine Kartenvisualisierung, um einen räumlich verorteten Datensatz in einer immersiven VR-Umgebung zugänglich zu machen [Rea+17].

Geografische und raumbezogene Daten werden im Kontext von InfoVis häufig in planaren, sphärischen oder reliefierten Kartenvisualisierungen dargestellt. Gegenüber konventionellen Kontexten der Kartendarstellung kann im Rahmen von Augmented Reality reichhaltigere Informationswahrnehmung, Interaktivität und Dynamik bereitgestellt werden, wie beispielsweise Adithya et al., sowie Carrera und Asensio untersuchten [Adi+10] [CB17]. Durch Hinzufügen zusätzlicher Visualisierungsebenen über der Kartendarstellung, können prinzipiell auch numerische, temporale oder relationale Daten räumlich verortet werden. Ready et al. kombinierten beispielsweise Kartenvisualisierungen mit dreidimensionalen Balkendiagrammen und zweidimensionalen Liniendiagrammen, um sensorische Daten in einer immersiven VR-Umgebung explorierbar zu machen (siehe Abbildung 4.6) [Rea+17]. Aufgrund der sehr hohen Dichte der Datenobjekte wurden die zweidimensionalen Liniendiagramme durch elastische Stränge mit der zugehörigen Balkendarstellung relational verknüpft. Eine analoge Kombination von Kartenvisualisierungen und 3D-Balkendiagrammen dokumentierte Brath bereits 1999 im Rahmen seiner Master-Thesis [Bra99].

Visualisierungstechnik	Kodierbare Rollen von Datendimensionen
 <p>Karten-Visualisierung Räumliche Verortung von Datenobjekten. Mittels weiterer Visualisierungsebenen sind zusätzliche Rollen kodierbar.</p>	<p>x-Achse \mapsto geografisch (Breitengrad) y-Achse \mapsto geografisch (Längengrad) Datenobjektfarbe \mapsto kategorisch Zusätzliche Visualisierungsebenen \mapsto numerisch, temporal, relational</p>

4.3.4 Repräsentation zeitbasierter Daten

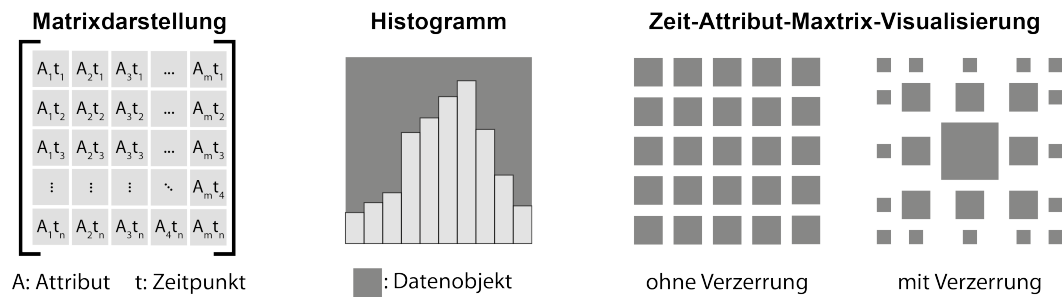



Abb. 4.7: Überblick über die Struktur der Zeit-Attribut-Matrix-Visualisierung.

Zeitbasierte Daten können in den meisten multivariaten, relationalen und geographischen Visualisierungstechniken in sekundärer Form kodiert werden. Durch interaktive UI-Elemente (z.B. Slider) kann dabei der darzustellende Zeitpunkt definiert werden. Für tiefgreifendere Analyse zeitbasierter Daten ist die Definition einer Visualisierung zur primären Repräsentation temporaler Rollen in einem Datensatz förderlich.

Die *Zeit-Attribut-Matrix* ist eine Visualisierungstechnik zur Kodierung zeitbasierter, numerischer und kategorischer Häufigkeitsverteilungen von Attributen. Die $m \times n$ -Matrix beinhaltet in den Spalten Attribute A und in den Zeilen Zeitpunkte t (siehe Abbildung 4.7). Ein Element $A_m t_n$ repräsentiert die Häufigkeitsverteilung des Attributes A_m zum Zeitpunkt t_n . Diese wird in den Datenobjekten der Visualisierung durch zweidimensionale Histogramm-Darstellungen, welche sich über der Ebene der interaktiven Oberfläche in einer Matrixstruktur aufspannen, kodiert. Durch Navigation entlang der Zeilen und Spalten können unterschiedliche Attribute und Zeitpunkte angesteuert und analysiert werden. Die Anwendung verzerrungsorientierter Techniken hilft dem Nutzer dabei das aktuell fokussierte Element von den Nachbarelementen zu unterscheiden.

Visualisierungstechnik	Kodierbare Rollen von Datendimensionen
 <p>Zeit-Attribut-Matrix</p> <p>Zeitbasierter Überblick über die Häufigkeitsverteilung numerischer und kategorischer Attribute.</p>	<p>Zeilen \mapsto temporal</p> <p>Spalten \mapsto numerisch, kategorisch</p> <p>Datenobjektfarbe \mapsto kategorisch</p>

4.4 Grundlegende Interaktions- und Visualisierungskonzepte

Um die zuvor erläuterten Interaktionsabläufe, Ansichten und InfoVis-Techniken in der Systemkonstellation der Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs zu konvergieren, werden im Folgenden grundlegende Interaktions- und Visualisierungskonzepte zur Unterstützung analytischer Prozesse im Umgang mit 3D-InfoVis präsentiert. Diese fördern vorwiegend das Überkommen herausfordernder Limitationen wie z.B.: die statische Auflösung der interaktiven Oberfläche oder die Interaktion mit 3D-Visualisierungen durch zweidimensionale Eingabe.

4.4.1 Verketteten von Informationsvisualisierungen

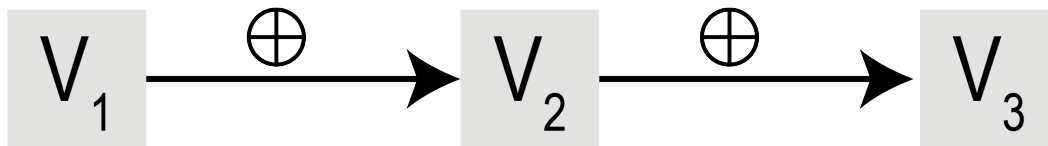


Abb. 4.8: Verkettung mehrerer Informationsvisualisierungen auf Basis von Mengenoperatoren.

Die analytische Untersuchung einer InfoVis gliedert sich in der Regel in mehrere Teilschritte. Das Resultat eines Schrittes dient dabei oftmals als Basis für einen darauffolgenden. Wenn beispielsweise in einem Scatterplot im Rahmen einer Analyse eine Menge von Datenobjekten selektiert wurde, kann durch Verkettung mit einer Karten-Visualisierung eine strukturelle Verknüpfung erzeugt werden. Hierdurch werden z.B. nur jene Datenobjekte in der Karten-Visualisierung kodiert, welche im vorangegangenen Scatterplot selektiert wurden. Diese Form der Verkettung funktioniert unabhängig von der Art der InfoVis und kann auch auf Basis verschiedener Mengenoperatoren, wie: Schnittmenge, Vereinigungsmenge, Differenzmenge oder symmetrische Differenz erfolgen (siehe Abbildung 4.8).

Werden nachträglich Änderungen in der Datenobjekt-Selektion einer InfoVis der Visualisierungskette getätigt, so wirken sich diese auf alle daran anknüpfenden Visualisierungen aus. Um die Verkettung nutzerverständlich zu kodieren, ist eine Visualisierung der Verknüpfungsstruktur in den Benutzerschnittstellen auf der interaktiven Oberfläche oder im AR-Darstellungsraum sinnvoll. Diese wird unter anderem in Kapitel 4.4.5 beim Konzept der „Miniaturansichten erstellter Informationsvisualisierungen“ erörtert. Zunächst wurde im Rahmen dieses Konzeptes darüber hinaus die Anpassung der Reihenfolge, der einzelnen Bestandteile der Visualisierungskette durch eine Drag-and-Drop-Geste in Betracht gezogen. Allerdings steht diese Interaktion in Konflikt mit typischen Analyse-Prozessen, bei denen die Reihenfolge einzelner analytischer Untersuchungen signifikant und oftmals nicht kommutativ ist.

4.4.2 Repräsentation der Selektionsmengen

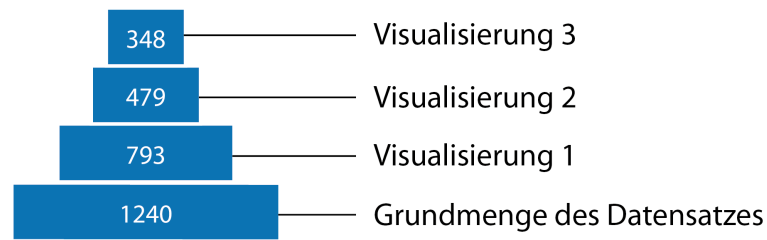


Abb. 4.9: Zweidimensionale Repräsentation der Datenobjekt-Anzahl, die in den einzelnen Informationsvisualisierungen der Visualisierungskette selektiert wurden.

Durch das zuvor erläuterte Verketteten von Informationsvisualisierungen auf Basis verschiedener Mengenoperatoren, verändert sich mit jedem analytischen Schritt in der Regel die Anzahl der kodierten Datenobjekte. Damit der Nutzer zu jedem Zeitpunkt einen Überblick über die Menge der in aktuellen und vorherigen Informationsvisualisierungen selektierten Datenobjekten erhält, wird dieses Verhältnis als zweidimensionale Hilfsvisualisierung im AR-Darstellungsraum repräsentiert (siehe Abbildung 4.9). Dies hilft dem Nutzer die Auswirkungen einzelner analytischer Untersuchungen in den Informationsvisualisierungen der Visualisierungskette besser nachzuvollziehen.

4.4.3 Rotation von Informationsvisualisierungen

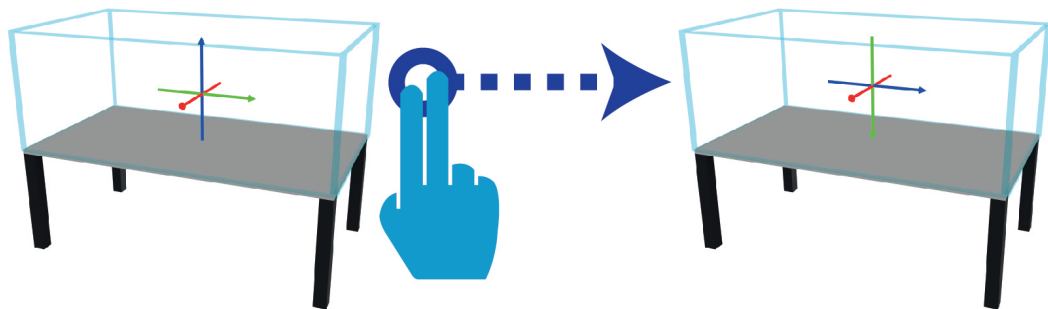


Abb. 4.10: Durch Ausführung einer 2-Finger-Swipe-Geste wird die Informationsvisualisierung um 90° in Ausführungsrichtung der Geste rotiert.

Die planare Interaktionsfläche des interaktiven Displays gewährt die präzise Manipulation zweier räumlicher Dimensionen. Da die in diesem Kontext betrachteten Informationsvisualisierungen Datenobjekte im dreidimensionalen AR-Darstellungsraum kodieren, bedarf es einer Möglichkeit die aus perspektivischen Gründen nicht einsehbare und nicht durch Interaktion zugängliche dritte Dimension fassbar zu machen. Daher sieht dieses Konzept die Rotation von Informationsvisualisierungen um 90° entlang einer Achse des zugehörigen Koordinatensystems vor (siehe Abbildung 4.10). Hierdurch wird die bisher verdeckte und passive Dimension zugänglich für Interaktion gemacht. Rotationsgeeignete Informationsvisualisierungen sind dabei durch die Kodierung von Daten in drei räumlichen Dimensionen charakterisiert (z.B. Streudiagramm). Die Durchführung dieser Operation erfolgt mittels einer fehlerrobusten 2-Finger-Swipe-Geste in der analytischen Ansicht der interaktiven Oberfläche. In Voraussicht auf die in Kapitel 4.4.2 definierten Werkzeuge mit räumlichen

Bezug, wirkt sich diese Rotation der InfoVis auch auf die Darstellung und Interaktion mit dem entsprechenden Werkzeug aus. Beispielsweise würden die in Kapitel 2.3.2 vorgestellten „Clipping Planes“ mit dem selben Koordinatensystem der InfoVis rotieren. Hierdurch verändern sich gegebenenfalls auch die in der analytischen Ansicht bereitgestellten Darstellungs- und Eingabemodalitäten des Werkzeugs.

4.4.4 Auslagerung von UI-Elementen in den AR-Darstellungsraum

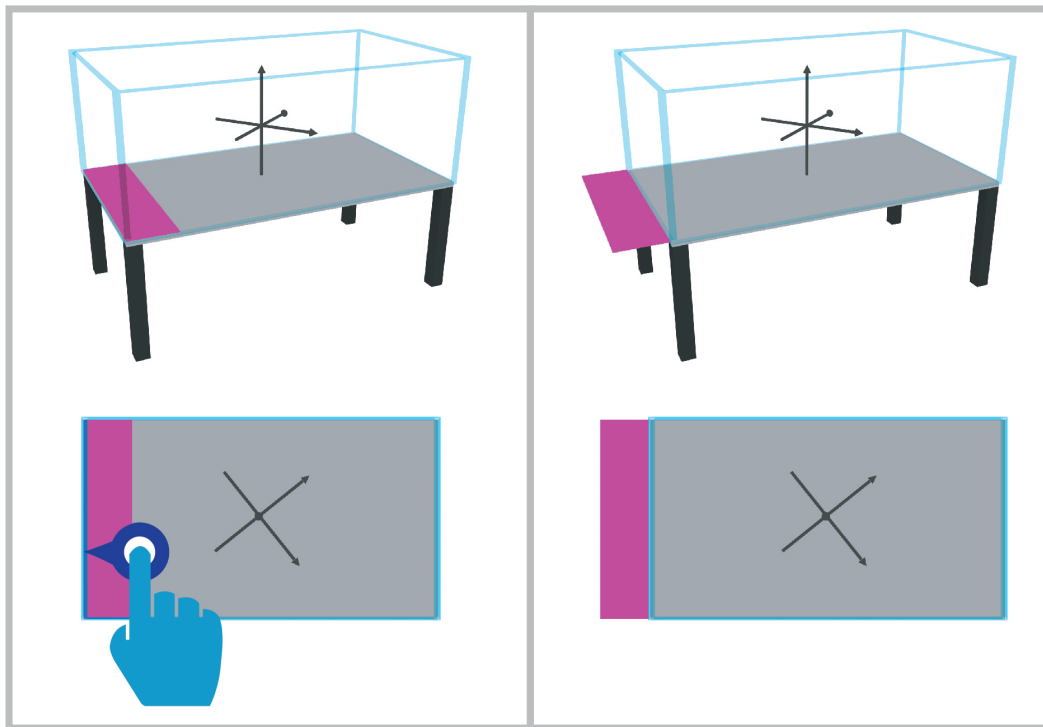


Abb. 4.11: Auslagerung eines UI-Elements (hier: lila) durch Ausführung einer Swipe-Geste in Richtung des Randes der interaktiven Oberfläche. Die Einlagerung geschieht durch die entgegengesetzte Swipe-Geste, welche vom Bildschirmrand ausgehend in Richtung des Zentrums der interaktiven Oberfläche erfolgt.

Die Darstellungskapazitäten der interaktiven Oberfläche und AR-HMDs sind durch eine statische Auflösung limitiert. Allerdings können durch räumliche Verortung der AR-Hologramme zusätzliche Informationen im AR-Darstellungsraum repräsentiert werden. Durch die egozentrische Perspektive von Head-Mounted Displays kann die Ansicht anhand natürlich impliziter Blickbewegungen verändert werden, sodass nicht auf explizite Interaktionen wie z.B. Scrolling zurückgegriffen werden muss. Die räumliche Verortung von Objekten in der physischen Umgebung des Nutzers fördert zusätzlich die Bildung präziser mentaler Modelle. Diese Vorteile können durch Auslagerung von UI-Elementen der interaktiven Oberfläche in den AR-Darstellungsraum zu Nutze gemacht werden (siehe Abbildung 4.11). Dabei können insbesondere die Benutzerschnittstellen ausgelagert werden, die keine Notwendigkeit für eine omnipräsente Eingabe-Bereitschaft haben und z.B. nur auf expliziten Bedarf benötigt werden. In diese Kategorie fallen beispielsweise statische UI-Elemente, welche Teile des Datensatzes textuell oder in Form unterstützender Visualisierungen repräsentieren. Konfigurative und

manipulative UI-Elemente, welche zur Eingabe von Parametern (z.B. zum Filtern über Datenfelder) dienen, können temporär aus dem AR-Darstellungsraum in den der interaktiven Oberfläche eingelagert werden. Die Durchführung der Auslagerung erfolgt durch eine vom UI-Element ausgehende und in die Richtung des Bildschirmrandes verlaufende Swipe-Geste und die Einlagerung durch eine entgegengesetzte Geste, bei der ein Swipe aus Richtung des in AR ausgelagerten UI-Elements in Richtung der Bildschirmmitte erfolgt.

Durch dieses Konzept lässt sich die Darstellungsfläche des interaktiven Displays nahtlos im AR-Darstellungsraum erweitern. In Hinblick auf die in Kapitel 4.2.3 konzipierten Benutzerschnittstellen erlaubt es darüber hinaus eine effiziente Ausschöpfung der Darstellungsfläche des interaktiven Displays und somit eine optimale Platznutzung hinsichtlich der Repräsentation von analytischen Werkzeugkomponenten (wie sie später in Kapitel 4.5 erläutert werden).

4.4.5 Miniaturansicht erstellter Informationsvisualisierungen

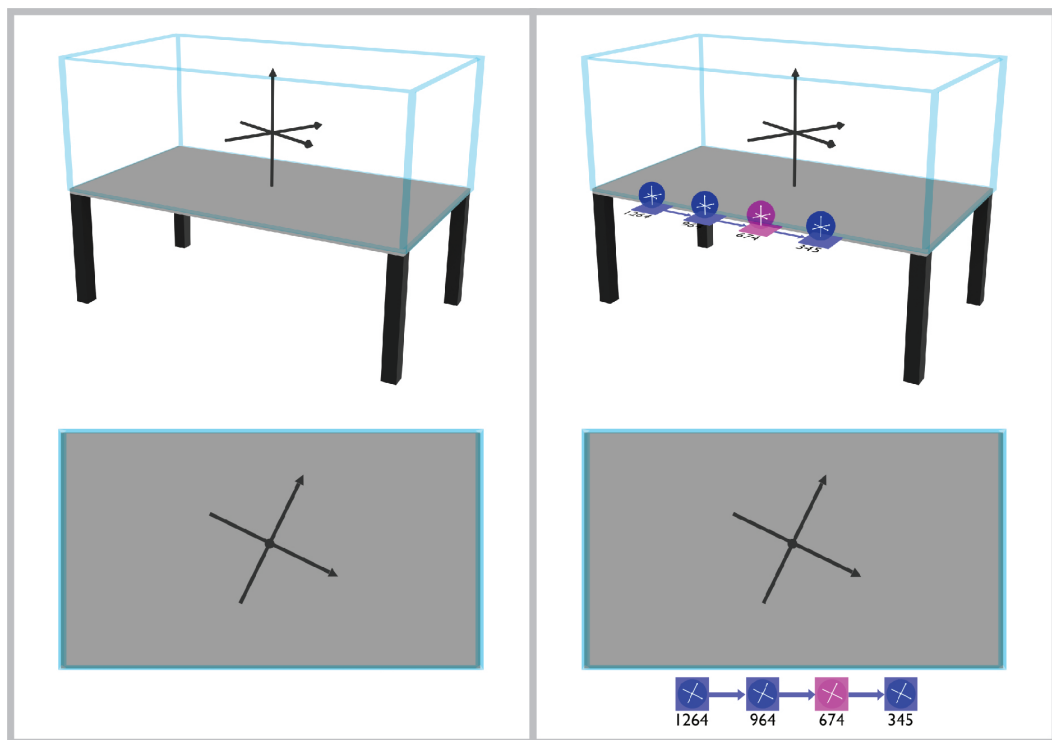


Abb. 4.12: Repräsentation von Miniaturansichten (hier: dunkelblau und lila) der erstellten Informationsvisualisierungen im Raum vor der interaktiven Oberfläche. Zu jeder Miniaturansicht wird die Anzahl der darin kodierten Datenobjekte repräsentiert. Die derzeit aktive Informationsvisualisierung wird farblich hervorgehoben (hier: lila).

Wenn im Verlaufe eines Analyseprozesses mehrere Informationsvisualisierungen erstellt werden, die durch das zuvor erläuterte Konzept des strukturellen Verkettens verknüpft sind, ist es für den Nutzer essentiell einen Überblick über diese Verkettung zu erhalten. Mit Hinblick auf das zuvor erläuterte Konzept der Auslagerung von UI-Elementen aus der

Anzeige der interaktiven Oberfläche in den AR-Darstellungsraum besteht die Möglichkeit ebendiese Verknüpfungsstruktur zu kodieren.

Hierfür werden die erstellten Informationsvisualisierungen in einer verkleinerten Version als dreidimensionale Miniaturansicht repräsentiert (siehe Abbildung 4.12). Die Platzierung erfolgt dabei bewusst außerhalb des Raumes über der interaktiven Oberfläche, da dieser für die derzeit aktive Informationsvisualisierung reserviert ist. Stattdessen werden die Miniaturansichten vor diesem Raum positioniert. Dies hat darüber hinaus die Motivation, dass die mittels AR-HMDs projizierten Hologramme tendenziell opak sind und ansonsten eine gegenseitige Verdeckung zwischen der aktuell dargestellten Informationsvisualisierung und Miniaturansicht verursacht.

Damit der Nutzer die Miniaturansichten von jeder Orientierung um die interaktive Oberfläche einsehen und erreichen kann, richten sich diese automatisch nächstmöglich zur Nutzerposition aus. In Hinblick auf kollaborative Szenarien, bei denen mehrere Nutzer simultan mit der interaktiven Oberfläche interagieren, sorgt diese automatische Ausrichtung der Miniaturansichten, sowie die Auslagerung dieser in den individuellen AR-Darstellungsraum zusätzlich für weniger Konflikte um den physikalischen Interaktions- und Darstellungsraum.

4.4.6 Nahtloser Wechsel zwischen Visualisierungen

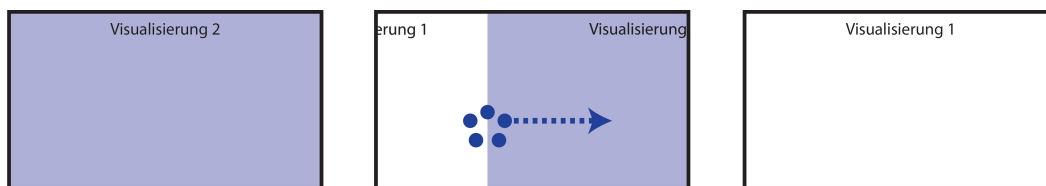


Abb. 4.13: Wechsel zwischen verschiedenen erstellten Visualisierungen durch eine 5-Finger-Swipe-Geste.

Der Wechsel zwischen verschiedenen erstellten Visualisierungen stellt eine fundamentale Aufgabe in dem in diesem Kapitel betrachteten Kontext dar. Um von natürlichen Eingabemodalitäten Gebrauch zu machen, wird zur Realisierung dieser Interaktion bewusst auf die Verwendung von UI-Elementen verzichtet. Stattdessen erfolgt der Transfer zwischen verschiedenen erstellten Informationsvisualisierungen einer Visualisierungskette durch eine 5-Finger-Swipe-Geste (siehe Abbildung 4.13). Diese Interaktion hat einen animierten, nahtlosen Wechsel zur vorherigen/nächsten InfoVis in der Visualisierungskette zur Folge. Das Konzept eines nahtlosen Übergangs zwischen verschiedenen Visualisierungen durch eine Touch-Geste wurde bereits in Butscher et al. 's „ART“-System angewandt [But+18]. Hier erfolgte der Wechsel durch eine 1-Finger-Swipe-Geste auf einem interaktiven Display. Da im Kontext der verschiedenen Konzepte die versehentliche Auslösung dieser Interaktion zu verhindern wurde sich für die Anwendung der fehlerrobusten 5-Finger-Swipe-Geste entschieden.

4.5 Werkzeuge zur Unterstützung analytischer Prozesse

Ein Werkzeug stellt im Kontext dieses Kapitels ein Hilfsmittel zur Unterstützung analytischer Prozesse im Umgang mit 3D-InfoVis dar. Die Werkzeuge werden dabei auf der interaktiven Oberfläche repräsentiert und gesteuert, während die Auswirkungen der Interaktion mit diesen insbesondere in der InfoVis im AR-Darstellungsraum sichtbar werden. In Kapitel 2.3.2 wurde bereits ein Überblick über existierende Werkzeuge im Umgang mit 3D-Visualisierungen präsentiert. Diese entspringen vorwiegend dem Kontext konventioneller Systeme und fanden bisher keine oder nur wenig Anwendung in immersiven AR-Umgebungen. Darüber hinaus sind diese nicht notwendigerweise für die Domäne der InfoVis konzipiert. Allerdings können grundlegende Techniken auf diesen Kontext adaptiert werden. Nachfolgend wird zunächst eine Unterscheidung zwischen Werkzeugen *ohne räumlichen Bezug* und *mit räumlichen Bezug* zu den Datenobjekten einer Informationsvisualisierung vorgenommen. Daraufhin werden drei Klassen generischer Werkzeuge präsentiert und deren Möglichkeiten in Hinblick auf analytische Untersuchung von 3D-InfoVis erläutert.

4.5.1 Kategorisierung der analytischen Werkzeuge

Im Rahmen der in diesem Kapitel betrachteten Systemkonstellation ist zwischen Werkzeugen *ohne räumlichen Bezug* und *mit räumlichen Bezug* zu den Datenobjekten der zugehörigen 3D-InfoVis zu differenzieren. In Kapitel 4.2.3 wurde bereits in Hinblick auf die analytische Ansicht eine Unterteilung der Benutzerschnittstelle in zwei Teilbereiche vorgenommen - jeweils einer für Werkzeuge ohne und mit räumlichen Bezug.

Werkzeuge ohne räumlichen Bezug

Werkzeuge *ohne räumlichen Bezug* stehen in der Regel in konkretem Zusammenhang mit einem Attribut des Datensatzes, ungeachtet der tatsächlichen physikalischen Position der Informationsvisualisierung und zugehöriger Datenobjekte. Dabei erfolgen analytische Untersuchungen auf Basis von numerischen Wertebereichen, kategorischen Ausprägungen oder Häufigkeitsverteilungen. Die Funktionsweise ist unabhängig von der verwendeten InfoVis-Technik. Diese Kategorie der Werkzeuge ist in einem exklusiven Bereich neben den Werkzeugen mit räumlichen Bezug platziert. Wenn keine Instanz eines Werkzeuges ohne räumlichen Bezug existiert, entfällt der zugehörige Teilbereich in der analytischen Ansicht und gibt dem Teilbereich für Werkzeuge mit räumlichen Bezug größtmöglichen Darstellungs- und Interaktionsraum.

Werkzeuge mit räumlichen Bezug

Werkzeuge mit *räumlichen Bezug* dienen insbesondere als Hilfsmittel, um die größere Anzahl räumlicher Dimensionen, der in AR dargestellten InfoVis zu reduzieren und mit der interaktiven Oberfläche zugänglich zu machen. Dabei ist die konkrete funktionelle Auswirkung des Werkzeugs auf die Informationsvisualisierung räumlich abhängig von dessen Position in Bezug auf die Datenobjekte. Die Manipulation einer InfoVis durch ein Werkzeug mit räumlichen Bezug erfolgt vorwiegend durch Verschieben, Rotieren oder Skalieren der zugehörigen UI-Elemente. Diese Kategorie der Werkzeuge ist in einem exklusiven Bereich unter dem Darstellungsraum der InfoVis positioniert, welcher signifikant größer ist als die Fläche der Werkzeuge ohne räumlichen Bezug. Dies ist erforderlich, da durch den direkten räumlichen Bezug zur Visualisierung mehr Flexibilität und Interaktionsfläche benötigt wird.

4.5.2 Generische Analyse-Werkzeuge

Die Werkzeuge haben die zugrundeliegende Motivation konkrete analytische Prozesse im Umgang mit 3D-InfoVis zu unterstützen. Sie fügen sich durch Interaktionsschnittstellen in die analytische Ansicht der interaktiven Oberfläche, als auch durch unterstützende Visualisierungen in Form von Hologrammen in den AR-Darstellungsraum ein. Die dominante Eingabeform stellt Touch-Interaktion auf dem interaktiven Display dar.

Während des Entwurfes der Werkzeuge ergaben sich zwei grundlegende Ansätze hinsichtlich der Konzeption. Der Erste betrachtet *hochspezialisierte Werkzeuge*, welche tendenziell *zielorientiert* in konkreten Hinblick auf die Lösung einer spezifischen Analyse-Aufgabe konzipiert werden, um z.B.: Datenobjekte zu Clustern, Extrema zu identifizieren oder Detailinformationen einzusehen. Im Gegensatz dazu umfasst der zweite Ansatz *generische Werkzeuge*, welche in ihrer Erscheinungsform und Funktionalität zur Laufzeit durch den Nutzer individualisiert werden können und einen eher *explorativen* Charakter aufweisen. In Anbetracht, dass die analytische Untersuchung von interaktiven Informationsvisualisierungen in diesem Kontext eher durch Vorgehensweisen explorativer Datenanalyse geprägt ist wurde sich für den zweiten Ansatz der generischen Werkzeuge entschieden.

Generische Werkzeuge besitzen nach ihrer Initialisierung in der analytischen Ansicht der interaktiven Oberfläche ein minimales visuelles und funktionelles Grundmaß. Dieses kann der Nutzer gemäß seiner analytischen Vorgehensweise durch verschiedene Parameter spezifizieren und so beispielsweise Funktionen des Werkzeugs anwenden, die bestimmte analytische Prozesse unterstützen. Um die Erwartungskonformität zu fördern wird ein möglichst konsistentes Set an Touch-Interaktionen im Umgang mit den generischen Werkzeugen verwendet. Im Folgenden werden drei Klassen generischer Werkzeuge erörtert: *interaktive Häufigkeitsverteilungen*, *ebenenbasiert* und *volumenbasiert*.

interaktive Häufigkeitsverteilungen

Kategorie:	– Ohne räumlichen Bezug zur Informationsvisualisierung
Motivation:	– Bereichsfilter über eine Datendimension
Werkzeug-Parameter:	– Kodiertes Datenfeld
Interaktion:	– Festlegen von numerischen, kategorischen oder temporalen Wertebereichen (<i>Tap auf jeweilige Repräsentation der Klassen in Häufigkeitsverteilung zum An- und Abselektieren</i>)
Interaktive Oberfläche:	– Stellt die interaktive Häufigkeitsverteilung dar.
Augmented Reality:	– Datenobjekte außerhalb des selektierten Bereichs werden halbtransparent.

Auf der interaktiven Oberfläche bereitgestellte *Visualisierungen von Häufigkeitsverteilungen* stellen ein generisches und analytisches Werkzeug ohne räumlichen Bezug zur im AR-Darstellungsraum kodierten 3D-InfoVis dar. Hierfür kann im Rahmen dieses Werkzeug-Konzepts eine einzelne Datendimension ausgewählt werden, die je nach Datentyp und Rolle zweckmäßig in Form einer zweidimensionalen Häufigkeitsverteilung interagirbar gemacht wird. Numerische, Kategorische und Temporale Rollen können beispielsweise in *Histogrammen*, *Treemap*- oder *Sunburst-Visualisierungen* kodiert werden. In Hinblick auf die analytische Untersuchung der 3D-InfoVis im AR-Darstellungsraum ermöglichen diese interaktiven Häufigkeitsverteilungen das schnelle und präzise Filtern von Datenobjekten anhand selektierbarer Wertebereiche. Im Folgenden soll dieses Werkzeug-Konzept beispielhaft anhand eines interaktiven Histogramms erörtert werden.

Ein Histogramm ist eine Visualisierungstechnik zur Repräsentation von Häufigkeitsverteilungen. Hierfür werden die Ausprägungen eines Datenfeldes in verschiedene Klassen eingeteilt und in Form von Balken mit einer konstanten oder variablen Breite repräsentiert. Die Höhe eines Balkens wird dabei durch die Klassenhäufigkeit und die Breite durch den Anteil am abgedeckten Wertebereich repräsentiert. Durch Tap auf einzelne Balken der Histogramm-Darstellung können Unter- und Obergrenzen definiert werden, wodurch nur jene Datenobjekte in der InfoVis im AR-Darstellungsraum repräsentiert werden, die innerhalb dieses Wertebereiches liegen (*siehe Abbildung 4.14 auf der folgenden Seite*). Datenobjekte die durch die Filterung entfallen können beispielsweise durch eine halbtransparente Darstellung in ihrer visuellen Prägnanz minimiert werden.

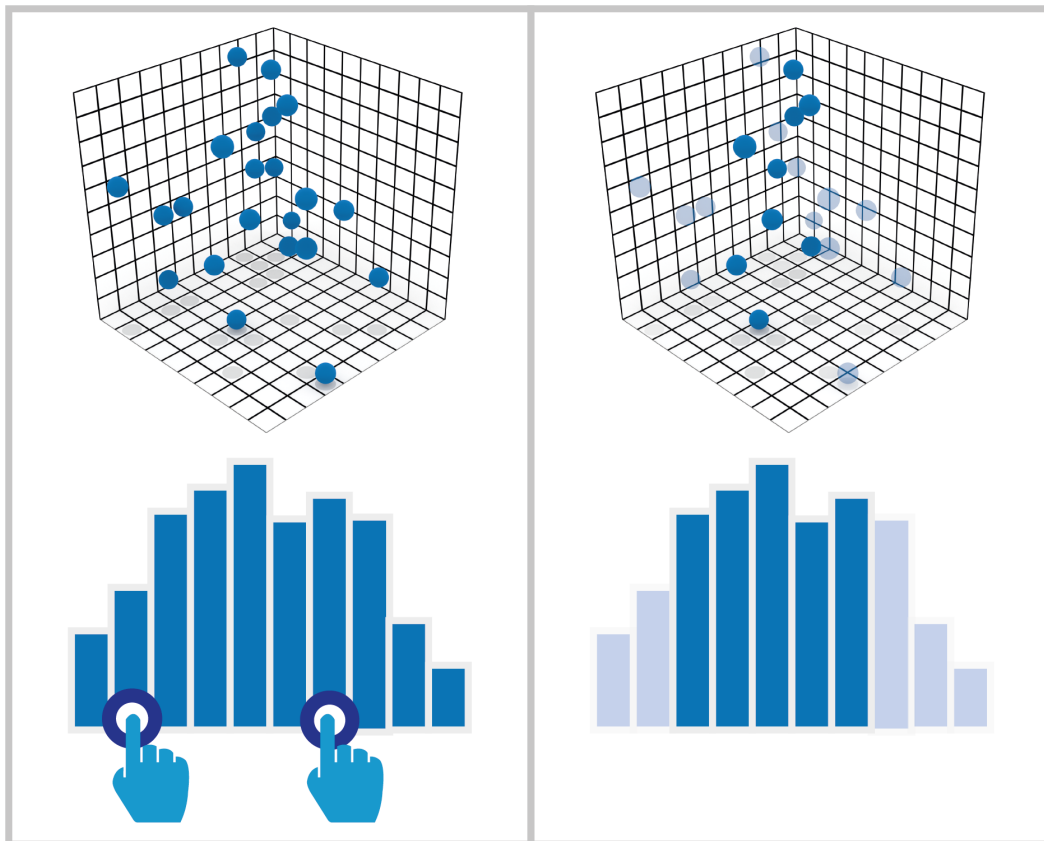


Abb. 4.14: Beispiel der Anwendung einer interaktiven Häufigkeitsverteilung in Form eines Histogramms zum Filtern über eine Datendimension. Mittels Tap auf die Balken des interaktiven Histogramms wird ein Wertebereich durch Unter- und Obergrenzen definiert. Alle Datenobjekte, die nicht Teil dieses Wertebereichs sind, werden als Folge halbttransparent dargestellt und dadurch in ihrer visuellen Prägnanz minimiert.

Im Kontext von Treemap- und Sunburst-Visualisierungen, als zugrundeliegende Form der Repräsentation von Häufigkeitsverteilungen, kann auf analoge Art und Weise gefiltert werden (z.B. durch An-/Abwählen kategorischer Ausprägungen). Prinzipiell könnten bei entsprechendem Platzmanagement, z.B. durch das in Kapitel 4.4.4 erörterte Auslagern von UI-Elementen, beliebig viele Instanzen solcher interaktiven Häufigkeitsverteilungen initialisiert und somit gleichzeitig über mehrere Datendimensionen gefiltert werden. Die Datendimensionen, über die durch Verwendung der interaktiven Häufigkeitsverteilungen gefiltert wird, müssen dabei nicht zwangsweise in der Informationsvisualisierung im AR-Darstellungsraum kodiert sein. Durch diese Unabhängigkeit können beispielsweise in einem 3D-Scatterplot, in dem drei quantitative Datendimensionen räumlich abgetragen werden, durch Verwendung einer Treemap kategorische Ausprägungen gefiltert werden, welche nicht direkt im selbigen Scatterplot kodiert sind. Für die Realisierung dieser unabhängigen Verwendung von interaktiven Häufigkeitsverteilungen bedarf es allerdings an Möglichkeiten zur Konfiguration dieser (z.B. unter Verwendung der konfigurativen Ansicht).

Ebenenbasierte Werkzeuge

Kategorie:	– Mit räumlichen Bezug zur Informationsvisualisierung
Motivation:	– Betrachtung von Teilbereichen einer Informationsvisualisierung.
Werkzeug-Parameter:	<ul style="list-style-type: none"> – Ebenen-Funktion (<i>Ausblenden außerhalb liegender Datenobjekte / Darstellung aller geschnittenen Datenobjekte / Darstellung von Detailwerten / Snapshots</i>) – Clipping-Orientierung – Eckpunkte der Ebene Translationsart (<i>Entlang Achsen</i>)
Interaktion:	<ul style="list-style-type: none"> – Erstellen von Ebenen (<i>Hold + Drag</i>) – Translation der Ebene (<i>Drag der Ebenenprojektion</i>) – Ausrichtung der Eckpunkte (<i>Drag der Handles</i>) – Festlegen der Clipping-Orientierung (<i>Swipe auf Fläche</i>) – Modus: nur Datenobjekte die unmittelbar von Ebene geschnitten werden (<i>Double Tap auf Ebenenprojektion</i>)
Interaktive Oberfläche:	– Stellt eine orthogonale Projektion der im AR-Darstellungsraum repräsentierten Ebene dar.
Augmented Reality:	– Visualisierung der Ebene im Koordinatensystem der Informationsvisualisierung. Nicht durch Clipping Plane eingegrenzte Datenobjekte werden halbtransparent.

Eine zweite identifizierte Klasse stellen generische ebenenbasierte Werkzeuge mit räumlichen Bezug zur Informationsvisualisierung dar. In ihrer Grundform weisen diese Parallelen zu den in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Clipping Planes (z. Dt. „Schnittebene“) auf. Ebenenbasierte Werkzeuge definieren eine Anpassung der Darstellung einer Informationsvisualisierung im AR-Darstellungsraum auf Basis einer oder mehrerer Ebenen im Koordinatensystem selbiger Visualisierung. Welche Datenobjekte dabei angepasst werden steht in Zusammenhang mit deren Position und Orientierung zur Ebene. Eine gängige Möglichkeit ist die halbtransparente Darstellung aller Datenobjekte vor der Ebene, um mögliche Verdeckung dahinterliegender Datenobjekte aufzulösen. Alternativ könnten aber auch lediglich die Datenobjekte hervorgehoben werden, die die Ebene unmittelbar schneidet. Prinzipiell ergeben sich hinsichtlich der Ebenenfunktionalität auch erweiterte Möglichkeiten. So könnten neben dem Hervorheben/Ausblenden von Datenobjekten auch Detailinformationen (wie z.B. Kennwerte) in der Ebene repräsentiert werden. Zum Vergleich verschiedener Ebenen einer 3D-InfoVis konzipierte Roscher das Generieren von „Snapshots“, um ein Abbild der aktuellen Ebenenfunktionalität zu speichern [Ros16]. Dieser kann zu einem späteren Zeitpunkt erneut abgerufen, oder für analytische Vergleiche anderen Snapshots gegenübergestellt werden.

Direkte Interaktion mit einem ebenenbasierten Werkzeug ist insbesondere durch Translation der Ebene und Ebenen-Eckpunkte (Handles) geprägt. Die zugehörige Schnittstelle auf der interaktiven Oberfläche stellt dabei eine orthogonale Projektion, der im AR-Darstellungsraum repräsentierten Ebene dar. Hierdurch kann der konkrete räumliche Bezug zwischen der Schnittstelle und den darüber befindlichen Datenobjekten dem Nutzer nachvollziehbar kommuniziert werden. Die Translation erfolgt entlang der Achsen des Koordinatensystems der zugehörigen InfoVis, da sich die Ebene ohne räumliche Begrenzung ins Unendliche erstreckt. Dies ist notwendig, um den Umgang mit Ebenen in Anbetracht der Freiheitsgrade der interaktiven Oberfläche zugänglich zu gestalten. Die Untersuchung konkret räumlich begrenzter Bereiche wird in der dritten Klasse generischer Werkzeuge erörtert.

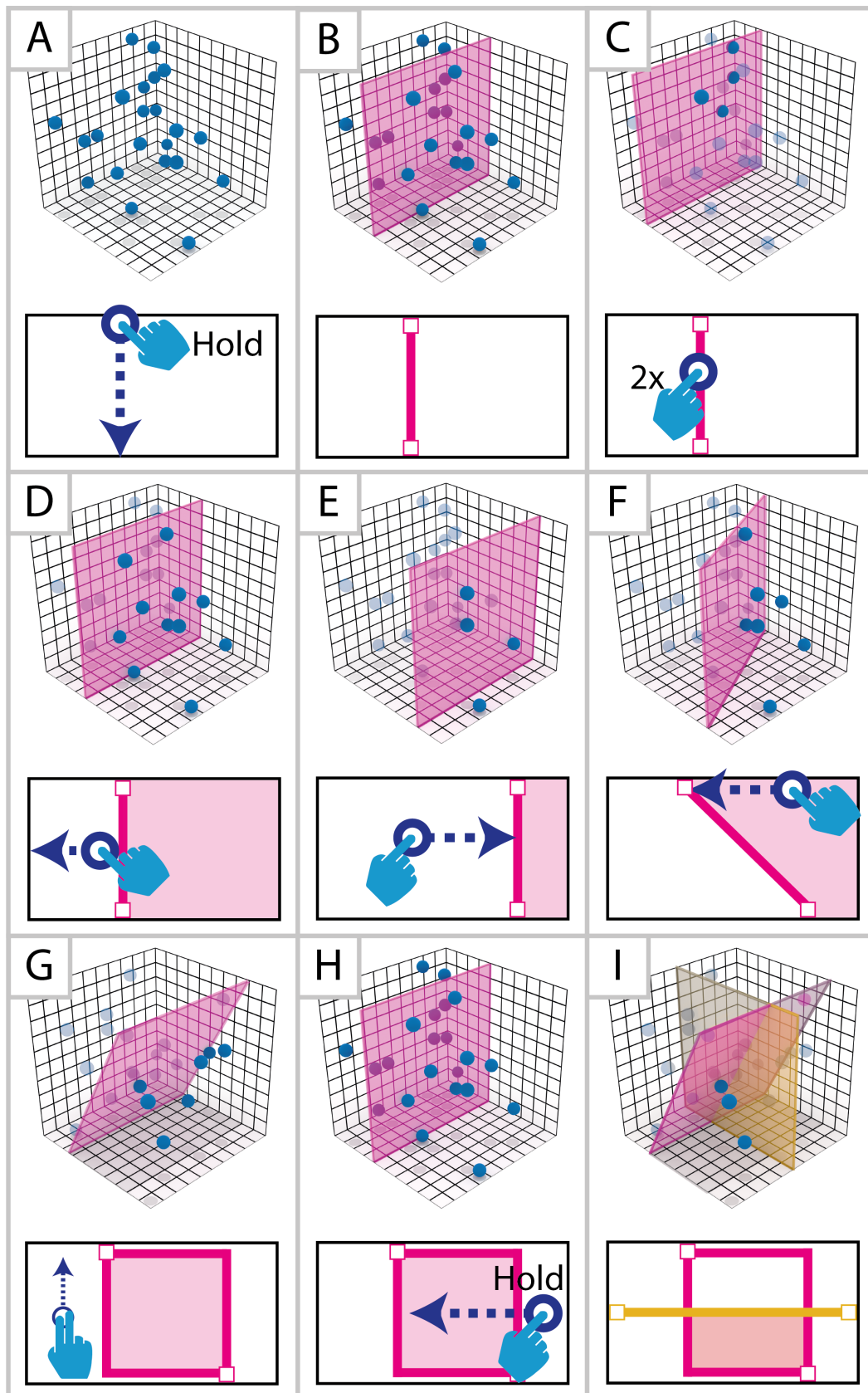


Abb. 4.15: Überblick über die verschiedenen Interaktionen mit ebenenbasierten Werkzeugen. Jeder Schritt ist durch die 3D-InfoVis und zugehöriger Interaktion auf der interaktiven Oberfläche illustriert. Eine Erläuterung der Schritte erfolgt auf der nächsten Seite.

Im Folgenden werden mit Bezug auf *Abbildung 4.15* die einzelnen Interaktionsschritte im Umgang mit ebenenbasierten Werkzeugen erörtert.

A, B: Das Erzeugen eines neuen ebenenbasierten Werkzeuges erfolgt durch kurzen Hold und darauffolgender Durchführung einer Drag-Geste. Die initiierte Ebene ist zunächst parallel zu einer Achse der zugehörigen Informationsvisualisierung ausgerichtet und besitzt zwei Handles am Anfang und Ende der Ebene.

C: Durch Double Tap auf die Ebene wird in einen Modus gewechselt, in dem jene Datenobjekte hervorgehoben werden, die die Ebene unmittelbar schneiden. Alle anderen Datenobjekte werden durch eine halbtransparente Darstellung in ihrer visuellen Prägnanz minimiert. Durch erneuten Double Tap kann dieser Modus wieder deaktiviert werden

D: Die erstellte Ebene teilt die Ansicht des interaktiven Displays in zwei Flächen. Das Clipping von Datenobjekten zu einer bestimmten Orientierung der Ebene kann als ein weiterer Modus durch Swipe auf einer dieser Flächen aktiviert werden. Als Folge werden alle Datenobjekte, welche im Raum über dieser Fläche verortet sind halbtransparent dargestellt, oder wie hier ausgeblendet.

E: Das Verschieben der Ebene erfolgt durch eine Drag-Geste. Dabei verläuft die Translation stets entlang der Achsen des zugehörigen Koordinatensystems.

F: Die Ausrichtung der Eckpunkte der Ebene kann durch eine von den Handles ausgehende Drag-Geste verändert werden.

G: Bei Rotation der gesamten Informationsvisualisierung (wie sie in Kapitel 4.4.3 erläutert wurde), wird die Ebene gleichermaßen rotiert, da sich diese im selben Koordinatensystem der InfoVis befindet. Da die zugehörige Schnittstelle auf der interaktiven Oberfläche stets eine orthogonale Projektion der im AR-Raum abgetragenen Ebene repräsentiert, verändert sich auch der dargestellte Ebenen-Umriss.

H, I: Prinzipiell können im Rahmen dieses Konzepts beliebig viele Instanzen von Ebenen mit den in Schritt A und B vorgestellten Techniken erstellt werden. Dies erzeugt allerdings eine herausfordernde Komplexität hinsichtlich der Bedienung auf der interaktiven Oberfläche und der Nachvollziehbarkeit in der Repräsentation im AR-Darstellungsraum. Da durch die Kombination mehrerer Clipping Planes prinzipiell ein begrenzter volumetrischer Raum aufgespannt wird, kann diese Teilinteraktion durch die im nächsten Teilkapitel vorgestellte Klasse der volumenbasierten Werkzeuge effektiver umgesetzt werden.

Volumenbasierte Werkzeuge

Kategorie:	– Mit räumlichen Bezug zur Informationsvisualisierung
Motivation:	– Datenobjekte in einem definierten Volumen analysieren und als Cluster abspeichern.
Werkzeug-Parameter:	– Volumen-Funktion (<i>Filtern / Zusatzinformationen darstellen / Clustern / Vergleich zweier Zeitpunkte</i>) – Form des Volumens (i.d.R. Primitiv) Translationsart (<i>frei im Raum</i>)
Interaktion:	– Erstellen des Volumens (<i>Hold + 2-Hand-Pinch</i>) – Translation des Volumens (<i>Drag auf Schatten</i>) – Manipulation der Form des Volumens (<i>Verschieben der Handles an Eckpunkten durch Drag-and-Drop</i>) – Markieren der vom Volumen eingeschlossenen Datenobjekte als Cluster (<i>Double Tap auf Schatten</i>) – Modus: Zusatzinformationen zu eingeschlossenen Datenobjekten darstellen (<i>Hold auf Schatten</i>) – Modus: Datenobjekte eines zusätzlichen Zeitpunktes innerhalb des Volumens darstellen (<i>Mapping des Zeitpunktes auf Volumen z.B. durch konfiguratives UI-Element</i>)
Interaktive Oberfläche:	– Stellt orthogonale Projektion des Volumens in Form eines Schattens dar. An den Eckpunkten befindliche Handles können zur Manipulation der Form verwendet werden.
Augmented Reality:	– Stellt das Volumen in Form eines Gitternetz-Objekts in der Informationsvisualisierung dar. Nicht durch Volumenobjekt eingegrenzte Datenobjekte werden halbtransparent.

Die dritte identifizierte Klasse generischer Werkzeuge stellen volumbasierte Ansätze mit räumlichen Bezug zur Informationsvisualisierung dar. Diese weisen in ihrer Interaktion auf Analogien zu ebenenbasierten Werkzeugen auf. Die wesentliche zugrundeliegende Motivation zur Konzeption volumenbasierter Werkzeuge besteht darin, dass die Kombination mehrerer ebenenbasierter Werkzeuge mit Herausforderungen hinsichtlich nutzerverständlicher Interaktion und Repräsentation im AR-Darstellungsraum einhergeht. Während die im vorherigen Teilkapitel definierten Ebenen sich ins Unendliche erstrecken, betrachten volumenbasierte Werkzeuge einen räumlich begrenzten Bereich innerhalb des Koordinatensystems der Informationsvisualisierung. Hierfür wird in der InfoVis im AR-Darstellungsraum das Gitternetz eines dreidimensionalen Primitivs (z.B. Würfel, Kugel o.Ä.) repräsentiert. Wie auch bei den ebenenbasierten Werkzeugen kann ein volumenbasiertes Werkzeug nach seiner Initialisierung auf der interaktiven Oberfläche mit verschiedenen Funktionalitäten verknüpft werden. Analog besteht beispielsweise die Möglichkeit Datenobjekte innerhalb des definierten Volumens hervorzuheben, während außerhalb liegende halbtransparent dargestellt werden.

Hinsichtlich der Analyse einer dreidimensionalen Informationsvisualisierung können auf Basis der eingeschlossenen Datenobjekte Zusatzinformationen (Auszug aus Rohdatensatz, berechnete Kennwerte oder Visualisierungen) im AR-Darstellungsraum angezeigt werden. Zusätzlich kann das Untersuchen und Markieren von Datenobjekt-Clustern unterstützt werden. Hierfür kann das Volumen beispielsweise genutzt werden, um eine Menge von Datenobjekten einzuschließen und durch Anwendung einer Geste farbig als Cluster zu markieren. Nach dem Markieren kann das Volumen erneut skaliert und verschoben werden, um weitere Cluster zu analysieren oder abzuspeichern.

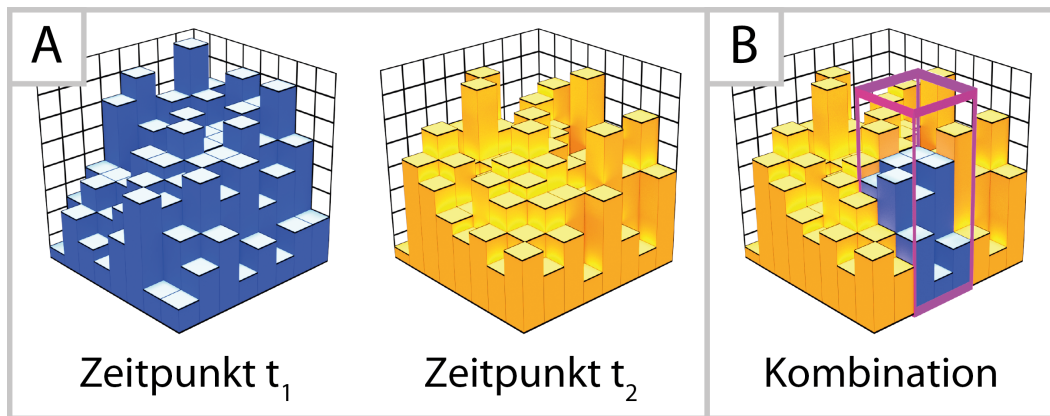


Abb. 4.16: **A:** Darstellung eines zeitbasierten Datensatzes zu zwei Zeitpunkten t_1 und t_2 in zwei einzelnen Informationsvisualisierungen.
B: Kombinierte Darstellung der Zeitpunkte in einer Informationsvisualisierung durch Verwendung eines volumenbasierten Werkzeuges. Die zugrundeliegende InfoVis kodiert Zeitpunkt t_1 , während innerhalb des Volumens (hier: lila) die Datenobjekte zu Zeitpunkt t_2 repräsentiert werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Unterstützung analytischer Prozesse stellt der Vergleich zweier Zeitpunkte im Rahmen eines zeitbasierten Datensatzes dar. Wenn beispielsweise innerhalb eines dreidimensionalen Balken- oder Streudiagramms Datenobjekte zu einem Zeitpunkt t_1 kodiert sind, können innerhalb des Volumens Datenobjekte zum Zeitpunkt t_2 repräsentiert werden (siehe Abbildung 4.16). Hierdurch ist ein nahtloser Vergleich innerhalb einer Informationsvisualisierung möglich, wodurch der Nutzer nicht auf die Erstellung mehrerer Instanzen der gleichen InfoVis zu unterschiedlichen Zeitpunkten, zurückgreifen muss.

Die Bedienung erfolgt wie bei ebenenbasierten Werkzeugen mittels einer Interaktionsschnittstelle auf der interaktiven Oberfläche. Diese repräsentiert eine orthogonale Projektion in Form eines Schattens, des im AR-Darstellungsraum visualisierten Volumens. In Anbetracht der Nutzerverständlichkeit ist es von essentieller Bedeutung, dass das Volumen im AR-Darstellungsraum präzise über der Schatten-Projektion auf der interaktiven Oberfläche verortet ist. Durch diese Nähe im Darstellungs- und Interaktionsraum kann der Anwender den relationalen und funktionalen Zusammenhang zwischen dem Schatten und dem Volumen nachvollziehen. Das Verschieben und Anpassen der Form des zugrundeliegenden Volumens erfolgt durch analoge Gesten, um ein konsistentes Set an Interaktionen in der analytischen Applikation bereitzustellen. Im Gegensatz zu ebenenbasierten Werkzeugen können volumenbasierte frei im Raum verschoben und unabhängig von den Achsen der Informationsvisualisierung in ihrer Form angepasst werden.

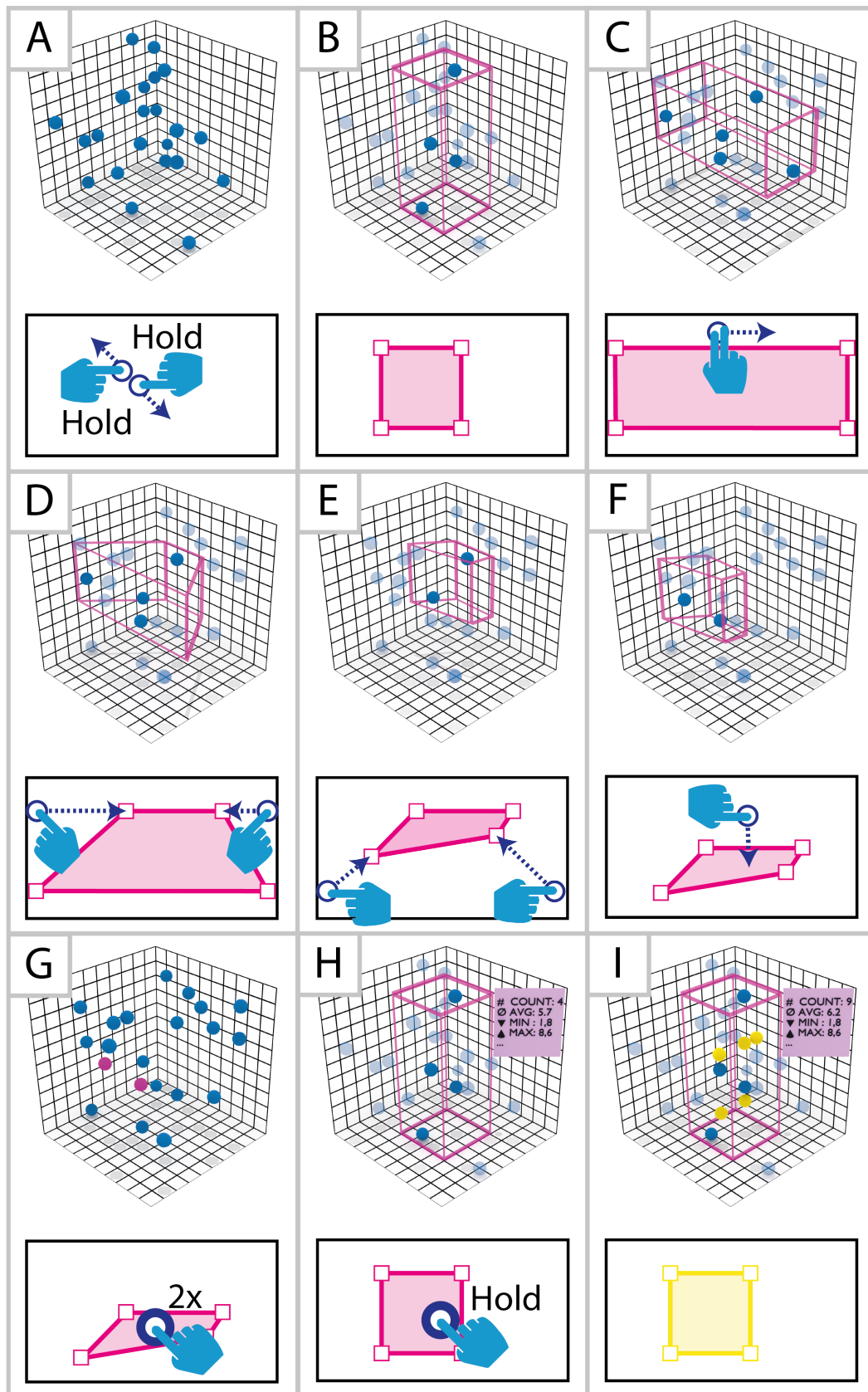


Abb. 4.17: Überblick über die verschiedenen Interaktionen mit volumenbasierten Werkzeugen. Jeder Schritt ist durch die 3D-InfoVis und zugehöriger Interaktion auf der interaktiven Oberfläche illustriert. Eine Erläuterung der Schritte erfolgt auf der nächsten Seite.

Im Folgenden werden mit Bezug auf *Abbildung 4.17* die einzelnen Interaktionsschritte im Umgang mit volumenbasierten Werkzeugen erörtert.

A, B: Erzeugen eines volumenbasierten Werkzeugs durch Durchführung einer 2-Hand-Pinch-Geste. Ausgehend vom Zentrum der Geste wird auf der interaktiven Oberfläche eine rechteckige Grundform erzeugt, zu der ein entsprechendes Gitternetz-Volumen im Koordinatensystem der InfoVis im AR-Darstellungsraum generiert wird. Die orthogonale Projektion auf dem interaktiven Display ist dabei räumlich präzise unter dem AR-Hologram verortet. An den Eckpunkten des Volumens befinden sich Handles, durch deren Verschiebung die Form des Volumens angepasst werden kann (siehe Schritt D).

C: Bei Rotation der gesamten Informationsvisualisierung (wie sie in Kapitel 4.4.3 erläutert wurde), wird das Volumen gleichermaßen rotiert, da sich dieses im selben Koordinatensystem der InfoVis befindet. Da die zugehörige Interaktionsschnittstelle auf der interaktiven Oberfläche stets eine orthogonale Projektion des im AR-Raum abgetragenen Volumens repräsentiert, verändert sich auch der dargestellte Projektions-Schatten.

D, E: Mittels einer Drag-and-Drop-Geste auf den Handles des Projektions-Schattens kann die Form des Volumens im AR-Darstellungsraum angepasst werden. Die Translation der Eckpunkte erfolgt dabei frei im Raum und nicht entlang der Achsen.

F: Die Translation des gesamten Volumens geschieht durch eine, von der Schattenprojektion ausgehende, Drag-and-Drop-Geste. Auch diese Translation erfolgt frei im Raum.

G: Der Nutzer kann in dem Volumen eingeschlossene Datenobjekte durch Anwendung einer Double-Tap-Geste als Cluster speichern. Dies kann in der Informationsvisualisierung z.B. durch Einfärbung der im Volumen beinhalteten Datenobjekte visualisiert werden.

H: Durch Hold auf die Schattenprojektion kann in einen Modus gewechselt werden, bei dem Zusatzinformationen zu den im Volumen eingeschlossenen Datenobjekten, in Form einer relational zum Werkzeug verknüpften Visualisierung, repräsentiert werden. Diese Zusatzinformationen können sich aus: Auszügen aus dem Rohdatensatz, automatisch berechneten Kennwerten (z.B.: Anzahl eingeschlossener Objekte, Durchschnitt, Extrema) oder zweidimensionalen Visualisierungen (z.B. Histogramme, Box-Plots) zusammensetzen. Der Modus kann durch einen erneuten Hold deaktiviert werden.

I: Um die Analyse zeitbasierter Daten zu unterstützen können innerhalb des Volumens Datenobjekte eines anderen Zeitpunktes dargestellt werden. Diese nahtlose Integration zweier Zeitpunkte in eine Visualisierung ermöglicht einen einfachen Vergleich hinsichtlich der Ausprägungen der abgetragenen Datendimensionen. Dabei können innerhalb des Volumens entweder: die Datenobjekte beider Zeitpunkte mit unterschiedlichen Farben kodiert (wie in der Abbildung) oder lediglich die Datenobjekte des zusätzlichen Zeitpunktes dargestellt werden. Da diese Interaktion nicht trivial und nutzerverständlich durch eine einzelne Touch-Geste abbildbar ist, müssten konfigurative UI-Elemente definiert werden, welche das Mapping eines weiteren Zeitpunktes auf das Volumen ermöglicht.

4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zunächst die Vorteile des „Augmented Displays“-Konzepts, welches die Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs vorsieht, erörtert. Diese bestehen insbesondere aus der Verschmelzung der Vorzüge interaktiver Oberflächen (präzise Interaktion) und AR-HMDs (immersive Exploration), sowie dem Überkommen derer Limitationen. In Hinblick auf den Anwendungskontext der Analyse von 3D-InfoVis wurden daraufhin die drei grundlegenden Aufgabenkategorien: *Konfiguration*, *Verwaltung* und *analytische Untersuchung* erörtert. In Vorbereitung auf die Konzeption wurden sechs verschiedene Rollen definiert, in welche Datenfelder eines Datensatzes klassifiziert werden können: *Textuell*, *Numerisch*, *Kategorisch*, *Temporal*, *Geografisch* und *Relational*. Daraufhin wurden verschiedene Interaktionsabläufe und wesentliche Teilschritte in Anbetracht der grundlegenden Aufgabenkategorien erörtert. Zur Vorbereitung der Konzeption wurden verschiedene InfoVis-Techniken zur Kodierung *multivariater*, *geografischer*, *relationaler* und *zeitbasierter* Datensätze präsentiert.

Zur Bereitstellung grundlegender Interaktionstechniken zur Analyse von 3D-InfoVis wurden: das *Verketten von Informationsvisualisierungen*, die *Repräsentation der Selektionsmengen*, die *Rotation von Informationsvisualisierungen*, die *Auslagerung von UI-Elementen in den AR-Darstellungsraum*, *Miniaturansichten erstellter Informationsvisualisierungen*, sowie der *nahtlose Wechsel zwischen Visualisierungen* konzipiert. In Hinblick auf Werkzeuge zur Unterstützung analytischer Prozesse im Umgang mit 3D-InfoVis wurde eine Differenzierung in *Werkzeuge ohne räumlichen Bezug* und *Werkzeuge mit räumlichen Bezug* vorgenommen. Um Prozesse explorativer Datenanalyse zu adressieren wurde bei der Konzeption der Werkzeuge eine generische Struktur gewählt. Abschließend wurden die drei Klassen generischer Werkzeuge: (*interaktive Häufigkeitsverteilungen*, *ebenenbasiert* und *volumenbasiert*) erörtert, welche ein Grundrepertoire an analytischen Operationen umsetzen.

Implementierung

Im vorangegangenen Kapitel wurden verschiedene Konzepte zur Unterstützung analytischer Prozesse im Umgang mit 3D-Informationvisualisierungen bei Erweiterung interaktiver Oberflächen durch AR-HMDs erörtert. Zum initialen Testen dieser Konzepte erfolgt die Implementierung ausgewählter Features in einer prototypischen Anwendung. Diese gewährt erste Einblicke in die Funktionstauglichkeit, sowie dem Zusammenwirken verschiedener Teilkonzepte. Im Folgenden werden zunächst die Rahmenbedingungen erörtert, welche die Implementierung aus technologischer Sicht definieren. Anschließend werden: die verwendeten Datensätze, die Struktur der Implementierung, sowie die umgesetzten Features detailliert beschrieben und wesentliche technische Limitierungen erläutert.

5.1 Technische Rahmenbedingungen

Die verwendete Hardware deckt sich mit den Voraussetzungen, unter denen die Konzepte im vorherigen Kapitel entwickelt wurden (*siehe Abbildung 5.1*). Als Augmented Reality Head-Mounted Display (AR-HMD) fungiert die Microsoft „HoloLens“ in der 2016 erschienenen „Development Edition“ [Cora]. Dieses HMD kann mittels eines mehrschichtigen, optischen Projektionsverfahrens in Kombination mit präziser Umwelt-Erkennung AR-Hologramme glaubwürdig in die physische Umgebung des Nutzers integrieren. Als interaktive Oberfläche wurde das 2012 veröffentlichte Samsung „SUR40“ mit Microsoft „PixelSense“ verwendet [Corb]. Dieser Tabletop ist mit einem Full-HD-Display ausgestattet, der flächendeckende Multi-Touch- und Multi-Tangible-Interaktion unterstützt.

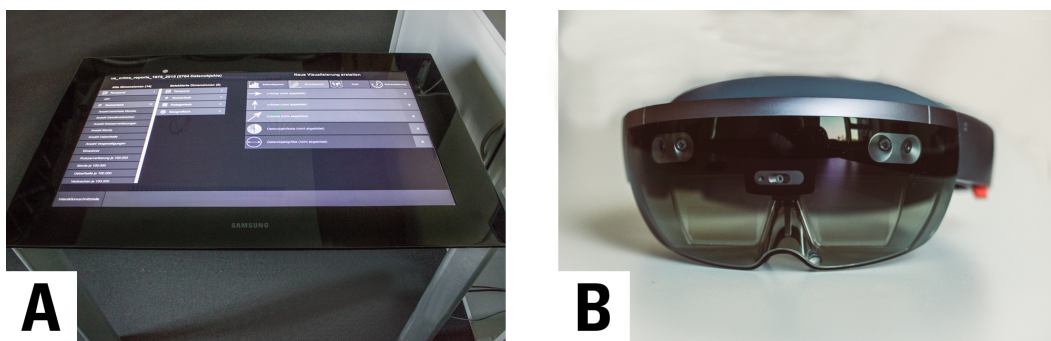


Abb. 5.1: Fotografien der kombinierten Systeme. **A:** Als interaktive Oberfläche fungiert das Samsung „SUR40“ mit Microsoft „PixelSense“ [Corb]. **B:** Das verwendete AR-HMD ist die Microsoft „HoloLens“ [Cora].

Software-seitig wurde die Engine: „Unity“ (Version: v2017.1.0p5) als grundlegende Laufzeit- und Entwicklungsumgebung verwendet [Uni]. Als ergänzende Frameworks wurden: das von Microsoft bereitgestellte „HoloToolkit“ (Version: v1.5.8.0) und Qian's „HoloLensAR-ToolKit“ (Version: v0.2) genutzt [Corc] [Qia]. Diese Frameworks beinhalten Skripte und Komponenten, welche die Entwicklung von Mixed-Reality-Applikationen unterstützen.

5.2 Verwendete Datensätze

Die Struktur eines Datensatzes ist bestimmend in Hinblick auf die Anwendbarkeit verschiedener InfoVis-Techniken und Analyse-Operationen. Im Kontext der prototypischen Implementierung erfolgte das Testen der Funktionalitäten unter Verwendung von zwei Open-Source-Datensätzen, die jeweils einzeln untersucht werden konnten. Der „Crime in Context“-Datensatz, welcher durch das „Marshall Project“ zusammengetragen wurde, enthält jährliche Statistiken zur Kriminalität in den einzelnen Bezirken der Vereinigten Staaten im Zeitraum zwischen 1975-2015 (2.829 Einträge) [Pro]. Der „Homicide Reports“-Datensatz, der vom „Murder Accountability Project“ erfasst wurde, enthält eine Auflistung erfasster Tötungsdelikte in den Vereinigten Staaten im Zeitraum zwischen 1980-2014 (638.000 Einträge) [Pro]. Die Datenobjekte beider Datensätze beinhalten dabei verschiedene quantitative und qualitative Attribute, die zur Kodierung textueller, numerischer, temporaler, geographischer und kategorischer Rollen von Datendimensionen (Definition in Kapitel 4.2.2) verwendet werden können. Relationen zwischen Datenobjekten können darüber hinaus beispielsweise durch Aggregation von kategorischen oder geographischen Rollen generiert werden.

Da im Rahmen der prototypischen Implementierung das Testen der Konzepte und nicht die Verarbeitung und Darstellung des vollständigen Datensatzes im Vordergrund steht, erfolgte eine Vorverarbeitung dessen unter Verwendung des Open-Source-Tool's „OpenRefine“ [Com]. Dies hat die zugrundeliegende Motivation den Rechenaufwand zum Laden der Daten zu reduzieren und für die Analyse untaugliche Datenfelder herauszufiltern (die z.B. nur sehr rar mit Inhalt befüllt sind). Der „Homicide Reports“-Datensatz wurde zusätzlich lediglich auf Datenobjekte reduziert, die im Bundesstaat Alaska verortet sind, um eine kleinere, in sich abgeschlossene Untermenge an Datenobjekte als Analysebasis verwenden zu können. Abschließend erfolgte eine Übersetzung der Labels in deutsche Sprache. Die Auswahl des Datensatzes, der in der prototypischen Implementierung analysiert werden soll, erfolgt beim Start der Tabletop-Applikation.

5.3 Bestandteile und Merkmale der prototypischen Implementierung

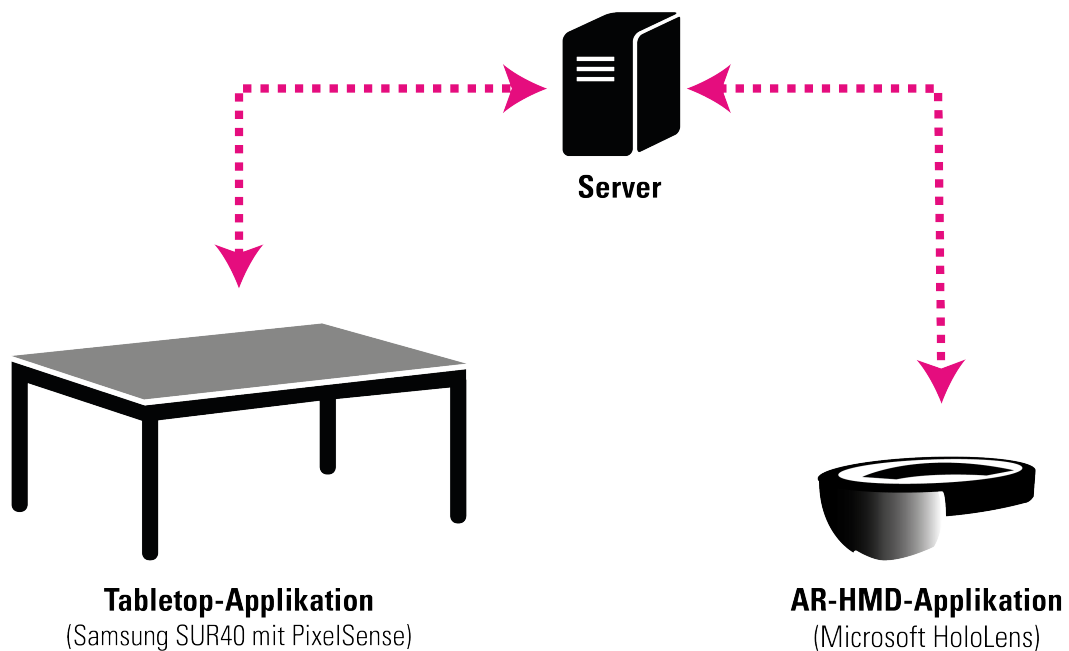


Abb. 5.2: Visualisierung der Grundstruktur. Die Tabletop- und die AR-HMD-Applikation können zur Laufzeit Informationen über einen Server austauschen.

Die prototypische Implementierung besteht aus zwei Applikationen: eine für das Tabletop- und eine für das AR-HMD-System (siehe Abbildung 4.2). Beide Applikationen sind in der Entwicklungsumgebung der Unity-Engine entstanden. Dabei gliedern sich die Applikationen in ein bereits bestehendes Projekt ein, welches Reipschläger und Dachzelt im Rahmen der „Augmented Displays“ (unpubliziert) an der Professur für Multimediatechnologie an der Technischen Universität Dresden umsetzen [Rei18]. Hierdurch standen hilfreiche Komponenten und Funktionalitäten zur Verfügung, die beispielsweise: die Netzwerkkommunikation, das Verankern von AR-Objekten in der physischen Umgebung oder mittels Datenstrukturen und Shadern die Entwicklung unterstützten. Der Austausch von Informationen zwischen den beiden entwickelten Applikationen wird durch einen Server realisiert, zu dem sich die Anwendungen bei der Initialisierung verbinden. Im Folgenden werden die wesentlichen Bestandteile der Tabletop- und AR-HMD-Applikation, sowie wesentliche Merkmale der Implementierung erörtert.

Tabletop-Applikation

Die Tabletop-Applikation dient zur Konfiguration von Informationsvisualisierungen, sowie dem Bereitstellen einer analytischen Schnittstelle zur Untersuchung der in AR dargestellten Informationsvisualisierung. Sie setzt sich aus drei verschiedenen Ansichten zusammen: einer *Start-Ansicht* (beim Initiieren der Applikation dargestellt, um zum Server zu verbinden), einer *konfigurativen Ansicht* (zum Erstellen einer InfoVis) und einer *analytischen Ansicht* (Interaktion und Manipulation einer erstellten InfoVis). Bei Durchführung analytischer Operationen, wie z.B. Filtern, Rotieren oder Einsatz analytischer Werkzeuge mit räumlichen Bezug,

werden entsprechende Informationen zu diesen Aktionen mit der AR-HMD-Applikation über den Server kommuniziert. Das Feedback zu Interaktionen in der analytischen Ansicht der Tabletop-Applikation erhält der Nutzer insbesondere in visueller Form in der AR-HMD-Applikation. Um eine möglichst schnelle Netzwerk-Kommunikation zwischen interaktiver Oberfläche und AR-HMD zu realisieren, wurden verschiedene Nachrichten-Typen definiert, welche die einzelnen analytischen Operationen modellieren. Der Austausch normierter Datenobjekte fundamentiert dabei auf der Erstellung zahlreicher Enumerationen und Klassen, welche beispielsweise zur Modellierung einer Informationsvisualisierung dienen.

AR-HMD-Applikation

Die AR-HMD-Applikation dient zur Integration der erstellten 3D-InfoVis in die physische Umgebung des Nutzers in Form von AR-Hologrammen. Dies beinhaltet das Erzeugen von Informationsvisualisierungen, auf Basis eines in der Tabletop-Applikation erstellten Modells, sowie der Visualisierung der auf der interaktiven Oberfläche durchgeführten analytischen Operationen (z.B. Filtern, Rotieren, Ebenen-/Volumen-basierte Werkzeuge).

Positionierung und Skalierung der AR-Hologramme

Eine Herausforderung im Rahmen der AR-HMD-Applikation war die korrekte Positionierung und Skalierung der in AR dargestellten Inhalte im Verhältnis zur interaktiven Oberfläche. Bereits geringfügige Abweichungen können die Wahrnehmung eines räumlichen Bezugs zwischen einem UI-Element der interaktiven Oberfläche und einem AR-Hologramm negativ beeinflussen. Die möglichst präzise Positionierung der AR-Hologramme wird durch manuelle Platzierung eines Ankerpunktes mittels einer Freihand-Geste beim Start der AR-Applikation realisiert. Eine korrekte Skalierung konnte durch Erstellung eines 3D-Modells der interaktiven Oberfläche als Bezugsobjekt sichergestellt werden.

Klassifikation der Datendimensionen in Rollen

Beim Start der jeweiligen Applikation wird eine CSV-Datei verarbeitet, die den zugrundeliegenden Datensatz beinhaltet. Hierbei werden die verschiedenen Datendimensionen (inklusive Labels), sowie weitere Kennzahlen (z.B. Anzahl Datenobjekte) erfasst. Die Klassifikation der in Kapitel 4.2.2 definierten Rollen von Datendimensionen kann zum Einen automatisiert mit Hilfe regulärer Ausdrücke, oder durch Auslesen manuell hinterlegter Annotationen in der CSV-Datei erfolgen. Die Tabletop-Applikation verwendet die identifizierten Datendimensionen, um diese dem Nutzer in einer Scroll-Liste in der konfigurativen Ansicht bereitzustellen. In der AR-HMD-Anwendung erfolgt die Anforderung der zu visualisierenden Daten. Diese sind dabei direkt als Ressource im Kontext der AR-HMD-Applikation verfügbar und müssen somit nicht über das Netzwerk kommuniziert werden.

Mesh-Batching als Beschleunigungsdatenstruktur

Dreidimensionale InfoVis besteht aus einer Vielzahl an Datenobjekten, welche jeweils durch ein Mesh (Gitternetz-Objekt wie: Würfel oder Kugel) repräsentiert wird. Da die Darstellung und Manipulation einer Vielzahl einzelner Meshes in der Unity Engine mit verringerter Effizienz und Performance einhergeht, wurde die Optimierungsdatenstruktur des „Mesh-Batching“ angewandt. Hierdurch werden die Meshes sämtlicher Datenobjekte in einem Mesh zusammengefasst, wodurch zuvor erwähnte Limitierungen zu einem Großteil entfallen.

5.4 Umgesetzte Features

5.4.1 Erstellen von Informationsvisualisierungen

Konfiguration einer Informationsvisualisierung

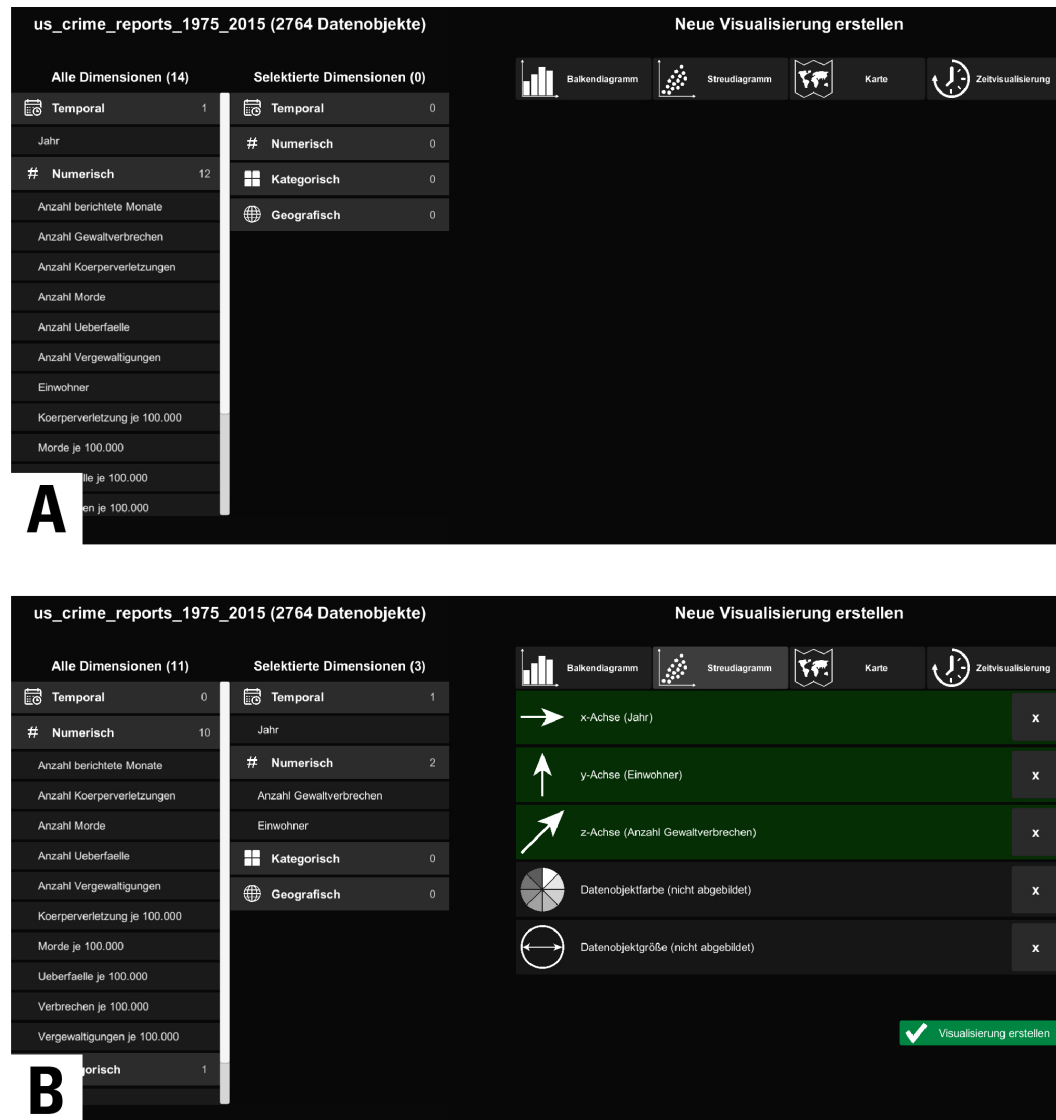


Abb. 5.3: Konfigurative Ansicht der Tabletop-Applikation. **A:** Überblick der verschiedenen verfügbaren Datendimensionen - geordnet nach Rollen in Scroll-Listen. **B:** Nach Abbildung der Datendimensionen auf räumliche und visuelle Variablen einer InfoVis-Technik kann die Konfiguration durch Tap auf den grün hervorgehobenen Button abgeschlossen werden.

Die Konfiguration einer Informationsvisualisierung wurde entsprechend der in Kapitel 4.2.3 definierten Benutzerschnittstelle umgesetzt (siehe Abbildung 5.3). Hierfür werden alle verfügbaren Datendimensionen, des zu untersuchenden Datensatzes, initial in einer Scroll-Liste dargestellt. Die Datendimensionen sind dabei entsprechend der in Kapitel 4.2.2 definierten Rollen gruppiert. Eine zweite, analog strukturierte Scroll-Liste kann genutzt werden, um

selektierte Datendimensionen separat abzulegen. Der Transfer einer Datendimension von einer Scroll-List in die Andere erfolgt mittels Tap oder Drag-And-Drop. Auf der rechten Seite der konfigurativen Ansicht befindet sich ein Auswahlfeld, über das die InfoVis-Technik ausgewählt werden kann. Je nach InfoVis-Technik bestehen verschiedene Optionen zum Abbilden von Datendimensionen auf visuelle und räumliche Variablen, wie es in Kapitel 4.3 definiert wurde. Das Abbilden erfolgt mittels einer Drag-And-Drop-Geste einer Datendimension auf die jeweilige visuelle oder räumliche Variable. Zur Unterstützung des Nutzers werden bei Durchführung dieser Geste geeignete Abbildungsmöglichkeiten farblich hervorgehoben. Wurde ein notwendiges Grundmaß an Abbildungen vorgenommen, kann die Erstellung der Informationsvisualisierung per Tap auf einen hervorgehobenen Button abgeschlossen werden.

Bereitstellung einer analytischen Ansicht

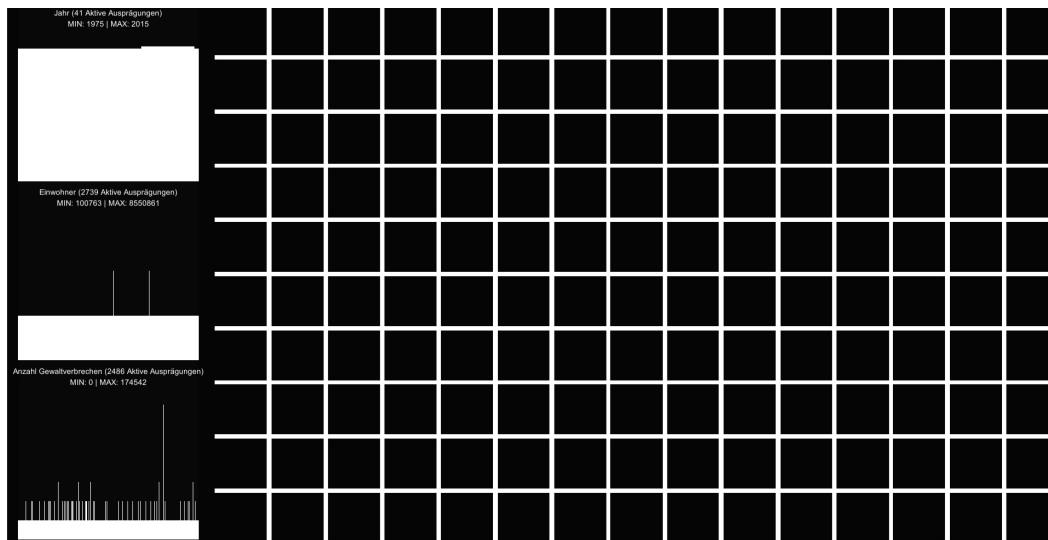


Abb. 5.4: Nach Erstellung einer Informationsvisualisierung wird eine zugehörige analytische Ansicht generiert. Im linken Bereich sind Werkzeuge ohne räumlichen Bezug und im rechten Bereich Werkzeuge mit räumlichen Bezug zur InfoVis verortet.

Die Erstellung einer Informationsvisualisierung hat die Generierung einer zugehörigen analytischen Ansicht zur Folge. Diese Benutzerschnittstelle setzt sich aus dem in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Layout zusammen (siehe Abbildung 5.4). Im linken Bereich befinden sich die realisierten interaktiven Histogramme, die Häufigkeitsverteilungen über: numerische, temporale und kategoriale Rollen von Datendimensionen kodieren. Die rechte Seite ist für Werkzeuge mit räumlichen Bezug reserviert, die mittels der in Kapitel 4.5.2 definierten Gesten bei Bedarf erstellt werden können. Da die erstellte Informationsvisualisierung direkt über diesem rechten Bereich verortet ist, wurde eine Gittervisualisierung der x-y-Ebene im selben Maßstab der AR-Gittervisualisierung als zusätzliches Bezugsobjekt kodiert.

Balken- und Streudiagramm als umgesetzte 3D-InfoVis-Techniken

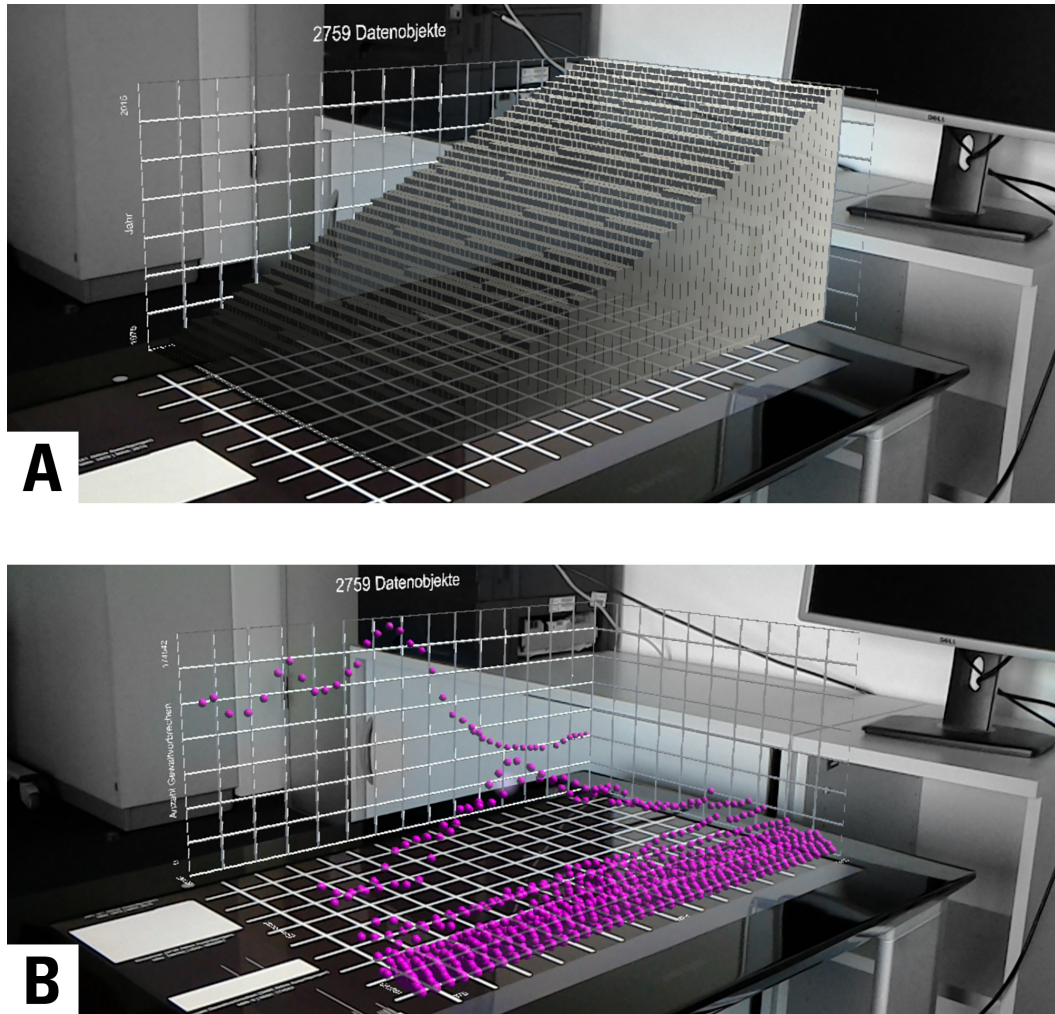


Abb. 5.5: A: Realisiertes Balkendiagramm zur Kodierung einer numerischen Ausprägung und optional einer Datenobjektfarbe. B: Umgesetztes Streudiagramm zur Kodierung dreier numerischer, temporaler oder geographischer Rollen von Datendimensionen und optional einer kategorischen Datenobjektfarbe und numerischen Datenobjektgröße.

Im Rahmen der prototypischen Implementierung wurden die beiden InfoVis-Techniken: Balken- und Streudiagramm realisiert (siehe Abbildung 5.5). Diese können insbesondere zur Kodierung numerischer und temporaler Rollen von Datendimensionen verwendet werden. Optional können jeweils kategorische Datendimensionen als Datenobjektfarbe und im Streudiagramm eine numerische Datendimension zur Kodierung der Datenobjektgröße angewandt werden.

Die erstellten 3D-Informationsvisualisierungen sind in eine Gittervisualisierung eingebettet, welche das Ablesen von Werten unterstützen soll. Diese Gittervisualisierung beinhaltet dynamisch generierte Achsenbeschriftungen, welche Auskunft über die Bezeichnung der kodierten Datendimension, sowie deren Minima und Maxima gibt. Über jeder Informationsvisualisierung ist darüber hinaus die Anzahl der derzeit aktiven Datenobjekte als zusätzliche Information kodiert.

5.4.2 Werkzeuge ohne räumlichen Bezug

interaktives Histogramm

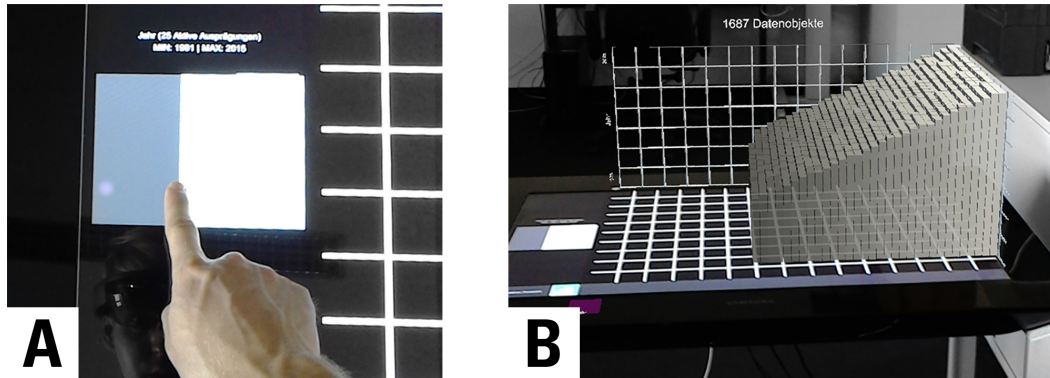


Abb. 5.6: **A:** Verwendung eines interaktiven Histogramms zur Filterung anhand eines Wertebereiches. **B:** Die Auswirkungen der Filter-Operation wird durch Anpassung der zugehörigen 3D-InfoVis im AR-Darstellungsraum kodiert.

In Hinblick auf die in Kapitel 4.5.2 definierten generischen Analyse-Werkzeuge wurde die Klasse der *interaktiven Häufigkeitsverteilungen*, welche ohne räumlichen Bezug zur zugehörigen Informationsvisualisierung steht, im Rahmen der prototypischen Implementierung realisiert (siehe Abbildung 5.6). Ein interaktives Histogramm kodiert entsprechend einer numerischen, temporalen oder kategorischen Datendimension die sortierte Verteilung derer Ausprägungen. Die zugehörige Benutzerschnittstelle wird im linken Bereich der analytischen Ansicht repräsentiert. Wenn der Nutzer mittels einer Tap-/Drag-and-Drop-Geste den Wertebereich verändert, wird die 3D-InfoVis im AR-Darstellungsraum entsprechend dieser Filter-Operation angepasst.

5.4.3 Werkzeuge mit räumlichen Bezug

In der Kategorie der Werkzeuge mit räumlichen Bezug zur InfoVis wurden: die Klasse der *ebenenbasierten* und *volumenbasierten* Werkzeuge im Rahmen der prototypischen Implementierung realisiert. Diese Kategorie ist im rechten Bereich der analytischen Ansicht verortet, über der sich die im AR-Darstellungsraum repräsentierte 3D-InfoVis befindet. Die jeweiligen Werkzeug-Schnittstellen können bei Bedarf mittels Gesten erstellt werden.

Ebenenbasiertes Werkzeug

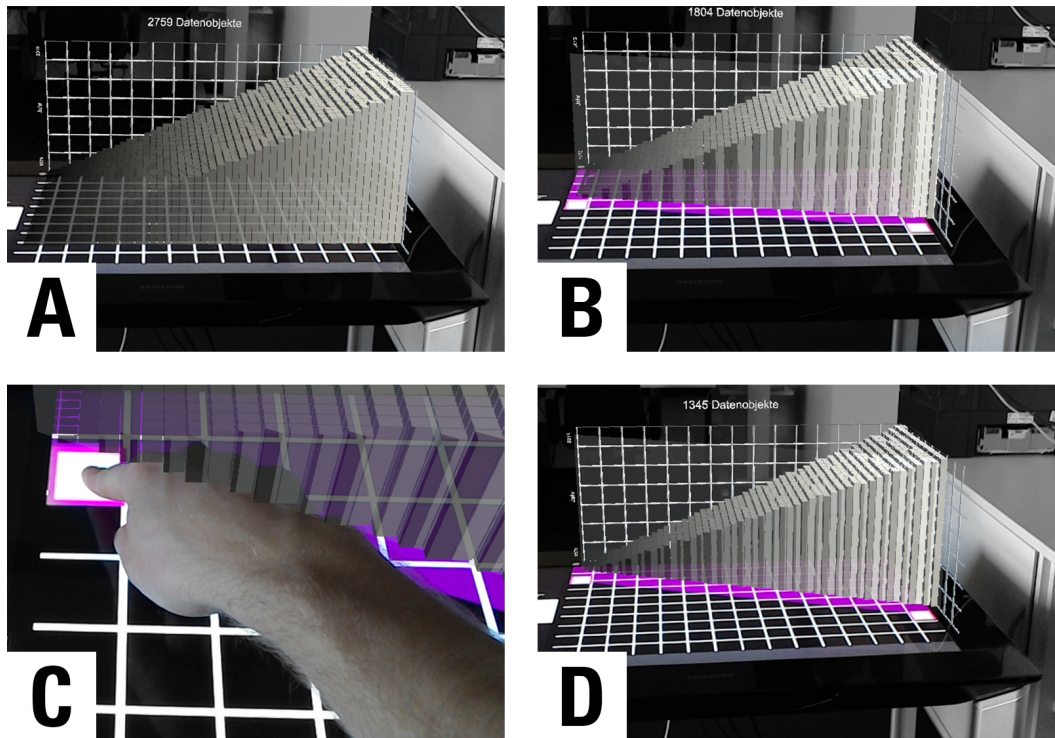


Abb. 5.7: Verwendung eines ebenenbasierten Werkzeugs. **A:** Balkendiagramm nach der Erstellung (ohne Anwendung jeglicher Filter). **B:** Nach Erstellung eines ebenenbasierten Werkzeugs werden alle Datenobjekte abgeschnitten, die vor der definierten Ebene positioniert sind. **C, D:** Eine Verschiebung der Handles verändert entsprechend die Position und Orientierung der Ebene und somit das Resultat der Ebenenfunktion.

Ein *ebenenbasiertes Werkzeug* wird mittels Hold und anschließender Drag-and-Drop-Geste auf dem rechten Bereich der analytischen Ansicht generiert. Die Ebene wird dabei entsprechend der durchgeführten Geste positioniert und orientiert. Dem Nutzer stehen nach der Erstellung zwei interaktive Handles zur Verfügung, mit denen dieser die Position und Orientierung der Ebene manipulieren kann (siehe Abbildung 5.7). Als Ebenen-Funktionalität wurde das Filtern von Datenobjekten realisiert. Hierdurch kann der Nutzer Verdeckungen auflösen oder die Menge der zu analysierenden Datenobjekte reduzieren, in dem jene ausgeblendet werden, die sich in dem Bereich vor der Ebene befinden.

Volumenbasiertes Werkzeug

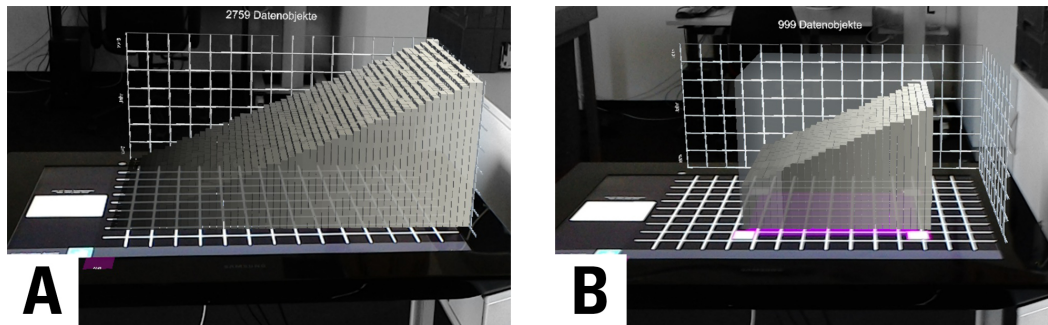


Abb. 5.8: A: Balkendiagramm nach der Erstellung (ohne Anwendung jeglicher Filter). B: Durch Erstellung eines volumenbasierten Werkzeugs werden jegliche Datenobjekte des Balkendiagramms herausgefiltert, die außerhalb des definierten Volumens positioniert sind.

Ein *volumenbasiertes Werkzeug* wird mittels Hold und anschließender 2-Hand-Drag-and-Drop-Geste auf dem rechten Bereich der analytischen Ansicht generiert. Das Volumen wird dabei entsprechend der durchgeführten Geste positioniert und durch vier Handles begrenzt (siehe Abbildung 5.8). Diese Handles kann der Nutzer mittels Drag-Gesten verschieben, um die Volumenform und Position zu manipulieren. Als Volumen-Funktionalität wurde das Filtern von Datenobjekten realisiert. Hierdurch kann der Nutzer Verdeckungen auflösen oder die Menge der zu analysierenden Datenobjekte reduzieren, indem jene ausgeblendet werden, die sich außerhalb des Volumens befinden.

5.4.4 Verketteten von Informationsvisualisierungen und Miniaturansichten

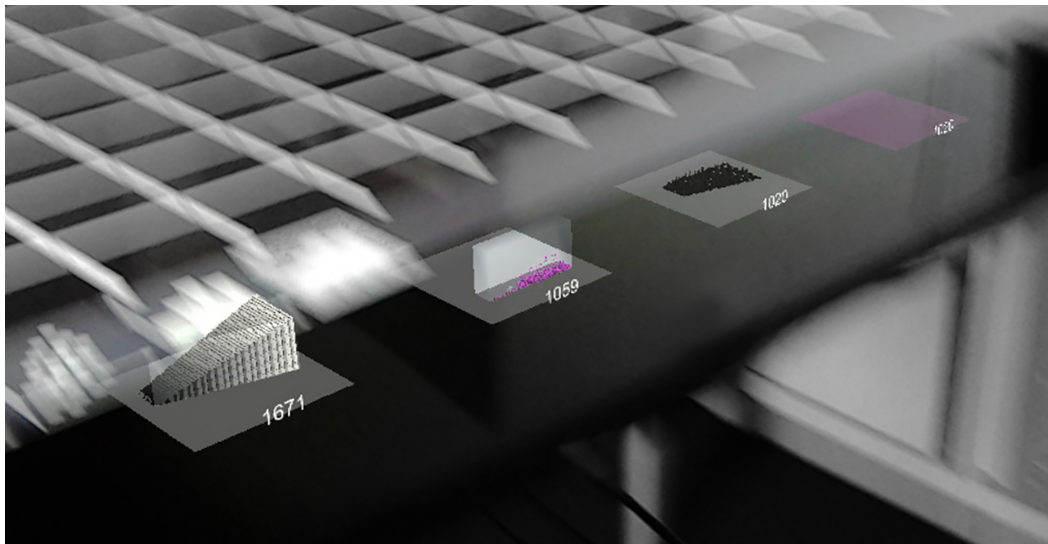


Abb. 5.9: Sequentiell angeordnete Miniaturansichten der erstellten Informationsvisualisierungen.

Das in Kapitel 4.4.1 erläuterte *Verketteten von Informationsvisualisierungen*, sowie die in Kapitel 4.4.5 definierte *Miniaturansicht erstellter Informationsvisualisierungen* wurden ebenfalls im

Rahmen der prototypischen Implementierung umgesetzt. Nacheinander konfigurierte und erstellte Informationsvisualisierungen sind dabei automatisch strukturell verknüpft, sodass in einer jeweiligen InfoVis nur die Datenobjekte kodiert sind, welche nicht in der vorherigen InfoVis herausgefiltert wurden. Dies hat auch zur Folge, dass analytische Operationen, die in einer InfoVis durchgeführt werden, stets auch automatisch auf alle strukturell nachfolgenden InfoVis angewandt werden. Hierdurch ist das sequentielle analysieren von Datenobjekt-Untermengen möglich.

Die Miniaturansichten der erstellten Informationsvisualisierungen werden in dem Raum vor der aktuell repräsentierten 3D-Informationsvisualisierung dargestellt. Eine Miniaturansicht repräsentiert die derzeit nicht im Hauptbereich dargestellten Informationsvisualisierungen in einer kompakten Form und gibt Auskunft über die Anzahl der aktuell darin aktiven Datenobjekte (siehe Abbildung 5.9).

5.5 Technische Limitierungen

Im Verlaufe der Implementierung wurden einige Einschränkungen deutlich, die sich aus Gegebenheiten der Hardware-Konstellation oder dem groben Detailgrad einer prototypischen Implementierung ergeben. Im Folgenden sollen wesentliche Limitierungen umrissen, sowie deren Relevanz und Lösungsmöglichkeiten erörtert werden.

Sichtfeld und Blickveränderung

Die als AR-HMD fungierende Microsoft „HoloLens“ deckt in der aktuell verwendeten Version ein horizontales Sichtfeld von lediglich 35 Grad ab (das menschliche Sichtfeld ist ca. 210 Grad). Dies sorgt dafür, dass AR-Hologramme, die nah am Nutzer positioniert sind, teils stark abgeschnitten werden, da sie außerhalb des HoloLens-Sichtfeldes liegen. Hierdurch kann der Nutzer größere/nahe Hologramme häufig nicht innerhalb des bereitgestellten Sichtfeldes wahrnehmen und muss durch scannende Blickveränderungen nach und nach das Hologramm in seiner Gesamtheit erfassen. Darüber hinaus sind Blickveränderungen in der HoloLens stets mit Kopfbewegungen verbunden, was für viele Nutzer zu einer unintuitiven User Experience beitragen kann, da Blickveränderungen aus dem Augenwinkel nicht möglich sind. Diese technischen Limitierungen werden mit hoher Wahrscheinlichkeit von zukünftigen Generationen von AR-HMDs adressiert und größere Sichtfelder, sowie Blickveränderung durch Eye-Tracking unterstützt.

Präzise und stabile Positionierung der AR-Hologramme

Durch Verwendung von Microsoft's „HoloToolkit“- und Qian's „HoloLensARToolKit“-Framework können AR-Hologramme relativ präzise und stabil in der physischen Umgebung des Nutzers verankert werden [Corc] [Qia]. Allerdings traten beim Testen mit dem Prototypen vereinzelt Positionierungs-Anomalien auf, bei denen die Hologramme nicht stabil verankert wurden und geringfügigen Translationen unterlagen. Dabei auftretende Ungenauigkeiten resultieren mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der hohen Reflektivität der interaktiven Oberfläche, welche das Infrarot-Tracking des AR-HMDs erschwert. Die in Kapitel 4.5.2 konzipierten Werkzeuge mit räumlichen Bezug bedürfen allerdings einer hohen Präzision in der Ausrichtung der 3D-InfoVis über der interaktiven Oberfläche. Durch eine Diskrepanz in der

Positionierung kann für den Nutzer die Nachvollziehbarkeit jener analytischer Operationen reduziert werden, die von einer präzisen räumlichen Verortung abhängen (z.B. ebenenbasierte und volumenbasierte Werkzeuge). Darüber hinaus ist eine präzise Positionierung der AR-Hologramme auch in Hinblick auf das Konzept der „Auslagerung von UI-Elementen in den AR-Darstellungsraum“ relevant, da hierdurch die Darstellungsfläche des interaktiven Displays möglichst nahtlos erweitert werden soll. Die Auflösung dieser Limitierung kann durch den Einsatz redundanter oder robusterer Tracking-Verfahren wie z.B. Marker-Tracking erfolgen.

Touch-Präzision und Ghost-Touches

Das Samsung „SUR40“ mit Microsoft „PixelSense“ verwendet optische, pixelbasierte Sensoren zur Realisierung der Touch- und Tangible-Erkennung. Dies hat zur Folge, dass helles Licht die Eingabe-Präzision mindern kann. Darüber hinaus können willkürlich auftretende und nicht durch den Nutzer initiierte Touch-Events (sogenannte: „Ghost-Touches“) ausgelöst werden. Diese können wiederum ungewollte Interaktionen verursachen, die den Nutzer irritieren oder in seinem Workflow stören. Die Auflösung dieser Limitierung erfolgte durch Verdunkelung des Raumes, in dem der Tabletop steht. Eine nachhaltige Auflösung dieser Limitierung könnte die Verwendung eines Tabletops mit hybriden Touch-Erkennungs-Mechanismen darstellen, die beispielsweise optische und kapazitive Touch-Erkennung kombinieren.

Latenz bei Kommunikation zwischen Tabletop- und AR-HMD-Applikation

Zwischen der Tabletop- und AR-HMD-Applikation werden zur Laufzeit verschiedene Informationen ausgetauscht. Beispielsweise wird nach Konfiguration einer Informationsvisualisierung oder bei Anwendung einer analytischen Operation jeweils ein Modell mit zugehörigen Informationen vom Tabletop zum AR-HMD übertragen. Diese Übertragung unterliegt teilweise einer Latenz von 500-1000ms und die Interaktionen werden insofern von dem Nutzer nicht mehr als unmittelbar wahrgenommen, wodurch dieser eventuell kurzzeitig seine Interaktion hinterfragt. Die Auflösung dieser Limitierung kann durch Anwendung schnellerer Kommunikations-Mechanismen, wie z.B. dem Einsatz optimierter Protokolle zur Datenübertragung erfolgen.

5.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden wesentliche Aspekte zur prototypischen Implementierung ausgewählter Konzepte erörtert. Die technischen Rahmenbedingungen decken sich dabei mit der in Kapitel 4 betrachteten Systemkonstellation, die eine Kombination einer interaktiven Oberfläche (z.B.: in Form eines Tabletops) mit einem AR-HMD vorsieht. Hierfür wurde jeweils eine Applikation für das Tabletop und eine für das AR-HMD-System in der Unity-Engine entwickelt. Diese Anwendungen tauschen über einen Server relevante Informationen zu den erstellten Informationsvisualisierungen und durchgeführten analytischen Operationen aus. Für die prototypische Implementierung wurden zwei Open-Source-Datensätze ausgewählt verwendet, die Kriminalitätsstatistiken in den Vereinigten Staaten beinhalten. Beim Start der Tabletop-Applikation kann der zu verwendende Datensatz ausgewählt werden. Die Applikationen gliedern sich des weiteren in ein bestehendes Projekt ein, welches ein Grundmaß an Funktionalitäten für die Entwicklung von Mixed-Reality-Anwendungen bereitstellt.

Im Rahmen der prototypischen Implementierung wurden ausgewählte Konzepte realisiert. Das *Erstellen von Informationsvisualisierungen* erfolgt unter Verwendung einer konfigurativen Ansicht, mittels derer Datendimensionen auf visuelle und räumliche Variablen einer InfoVis abgebildet werden können. Im Anschluss steht dem Nutzer eine analytische Ansicht zur Verfügung, welche entsprechend der abgebildeten Datendimensionen interaktive Histogramme bereitstellt. Die eigentliche 3D-InfoVis wird als AR-Hologramm von der AR-HMD-Applikation generiert. Hierfür wurden die InfoVis-Techniken: Balken- und Streudiagramm realisiert, welche numerische, temporale und kategoriale Rollen von Datendimensionen kodieren können. Die Untersuchung der 3D-InfoVis in Hinblick auf Wertebereiche wird durch die Werkzeug-Klasse der *interaktiven Histogramme* unterstützt. Analytische Untersuchungen mit konkret räumlichen Bezug zu den Datenobjekten einer InfoVis wird durch Bereitstellung *ebenenbasierter* und *volumenbasierter* Werkzeuge realisiert, welche auf Bedarf mittels Gesten instanziiert werden können. Entsprechend des in Kapitel 4.5.1 definierten Konzepts zur *Verkettung von Informationsvisualisierungen* werden analytische Operationen, die auf eine InfoVis angewandt werden, auch auf alle nachfolgenden Informationsvisualisierungen übertragen. Um zusätzlich einen kompakten Überblick über die erstellten Informationsvisualisierungen bereitzustellen wurde das in Kapitel 4.4.5 definierte Konzept der *Miniaturansichten* realisiert.

Beim Testen der Implementierung wurden einige technische Einschränkungen deutlich, die Auswirkungen auf die User Experience im Kontext des Prototypen haben. Die technischen Limitierungen umfassen dabei die Bereiche: *Sichtfeld und Blickveränderung*, *Präzise und stabile Positionierung der AR-Hologramme*, *Touch-Präzision und Ghost-Touches*, sowie *Latenz bei Kommunikation zwischen Tabletop- und AR-HMD-Applikation*. Diese Limitierungen können teils durch zukünftige Generationen von AR-HMDs und Tabletops, sowie durch Verwendung robusterer Mechanismen aufgelöst werden.

Diskussion

Im bisherigen Verlauf dieser Arbeit wurden verwandte Arbeiten aus den Bereichen: Mixed-, Augmented- und Virtual-Reality, Unterstützung analytischer Prozesse und Interaktion mit 3D-InfoVis präsentiert. Fundamentierend auf dieser Wissensbasis wurde folgend das Konzept der „Augmented Displays“ (unpubliziert) von Reipschläger und Dachsel erörtert, sowie verschiedene Konzepte zur Unterstützung analytischer Prozesse bei Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs entwickelt [Rei18]. Ausgewählte Features dieser Konzeption wurden im Rahmen einer prototypischen Implementierung realisiert. Im Folgenden werden die Konzepte und für deren Funktionsweise relevante Aspekte kritisch diskutiert.

6.1 Nähe des Nutzers zu AR-Hologrammen

Die Systemkonstellation, unter der die Konzepte entwickelt wurden, sieht die Kombination einer interaktiven Oberfläche mit einem AR-HMD vor. Hierdurch wird deduktiv definiert, dass der Nutzer im unmittelbaren Umfeld der interaktiven Oberfläche steht/sitzt, da dieser die Applikation mittels Multi-Touch steuert. Dies hat zur Folge, dass die Größe der dargestellten AR-Hologramme von besonderer Relevanz ist, da diese sich unter Umständen gegenseitig verdecken, bzw. die Übersicht über die einzelnen Komponenten beeinträchtigen können. Das Testen mit der prototypischen Implementierung hat gezeigt, dass bereits geringfügige Variationen der Nutzerposition (z.B. stehend versus sitzend) in teils fundamentalen Unterschieden in der Wahrnehmung der AR-Hologramme resultieren. Einer der wesentlichen Vorzüge immersiver AR-Umgebungen stellt die Bildung eines präzisen mentalen Modells auf Basis physischer Navigation dar. Durch zuvor erläuterte Umstände kann dieser Vorzug negativ beeinträchtigt werden. Eine mögliche Lösung stellt die adaptive Skalierung und Positionierung von AR-Hologrammen anhand der Position und Blickrichtung des Nutzers dar. Insgesamt ist in dieser Hinsicht auf eine grundlegende Balance der im AR-Darstellungsraum repräsentierten Hologramme zu achten.

6.2 Verdeckung der interaktiven Oberfläche durch AR-Hologramme

Ein Teilziel der Bereitstellung von 3D-InfoVis in immersiven AR-Umgebungen ist es Limitierungen der Darstellung auf konventionellen Ausgabemedien aufzulösen. Eine dieser Einschränkungen stellt die gegenseitige Verdeckung der einzelnen Datenobjekte innerhalb einer 3D-Informationsvisualisierung dar. Während diese Limitierung durch physische Navigation aufgelöst wird, ist eine zusätzliche Dimension der Verdeckung zu berücksichtigen. Je nach Blickwinkel und Position des Nutzers können die tendenziell opaken AR-Hologramme, die auf der interaktiven Oberfläche dargestellten UI-Elemente verdecken. Hierdurch kann die Wahrnehmung und Bedienung von Benutzerschnittstellen negativ beeinträchtigt werden.

Das in Kapitel 4.4.4 entwickelte Teilkonzept der Auslagerung von UI-Elementen in den AR-Darstellungsraum wirkt dieser Problematik bereits entgegen. Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass ausgelagerte Elemente bis zu ihrer erneuten Einlagerung in die interaktive Oberfläche nicht bedient werden können. Die Kategorie der ebenen- und volumenbasierten-Werkzeuge sind darüber hinaus ohnehin nicht für eine solche Auslagerung geeignet, da diese einen konkreten räumlichen Bezug zu den Datenobjekten einer Informationsvisualisierung besitzen. Eine weitere Lösungsmöglichkeit stellt adaptives Clipping der AR-Hologramme in dem Bereich um die interagierende Hand des Nutzers dar. Hierdurch würde die Wahrnehmung verdeckter UI-Elemente gesteigert werden können. Ein zusätzlicher Parameter zur Auflösung dieser Problematik stellt die Erhöhung des vertikalen Abstandes zwischen der in AR dargestellten 3D-Informationsvisualisierung und der Ebene der interaktiven Oberfläche dar. Je nach Haltung des Nutzers (sitzen/stehend), kann hierdurch die Wahrnehmung der UI-Elemente gefördert werden, geht allerdings mit dem Dilemma einher, dass eine erhöhte Distanz die Nachvollziehbarkeit zwischen dem räumlichen Bezug der AR-Hologramme und der interaktiven Oberfläche reduziert.

6.3 Interaktion und Wahrnehmung des zugehörigen visuellen Feedbacks

Das Testen der prototypischen Implementierung hat eine Disharmonie bei Interaktion mit der interaktiven Oberfläche und gleichzeitiger Wahrnehmung des visuellen Feedbacks dieser Aktion in den AR-Hologrammen offenbart. Die in Kapitel 4.5.2 definierten Werkzeuge ohne räumlichen Bezug zur Informationsvisualisierung sind in einem gesonderten Bereich auf der interaktiven Oberfläche verortet. Wenn der Nutzer nun mit einem dieser Werkzeuge (z.B. einem interaktiven Histogramm) interagiert, ist dessen Blick auf dem zugehörigen UI-Element fokussiert. Hierdurch kann der Nutzer die Auswirkung analytischer Operationen (wie z.B. Filtern von Wertebereichen) nicht unmittelbar in der Informationsvisualisierung wahrnehmen, da diese nur partiell im aktuellen Sichtfeld des Nutzers einsehbar ist. Diese Kluft zwischen Interaktion und visuellem Feedback wird insbesondere durch das sehr geringe Sichtfeld aktueller AR-HMDs verstärkt.

Zukünftige Generationen von AR-HMDs, die mit einem größeren Sichtfeld einhergehen, können sicherlich zur hinreichenden Auflösung dieser Problematik beitragen. Da sich die prototypisch implementierte Mixed-Reality-Anwendung in die Domäne der *Immersive Analytics* eingliedert, können darüber hinaus existierende Erkenntnisse zur Anreicherung der Immersion angewandt werden. Chandler et al. halten in dieser Hinsicht beispielsweise fest, dass ein wahrlich immersiver Eindruck nicht nur durch die visuelle Wahrnehmung bestimmt wird, sondern auch durch auditive und haptische [Cha+15]. Da die meisten modernen AR-HMDs auch Möglichkeiten zur Audioausgabe bereitstellen, kann ein zusätzlicher auditiver Feedback-Kanal beispielsweise das Filtern von Datenobjekten in redundanter Form kodieren.

6.4 Touch-zentrierte-Interaktion und UI-Elemente

Touch bzw. Multi-Touch-Interaktion stellt die dominante Eingabeform in den Konzepten und der realisierten Implementierung dar. Insbesondere für den Umgang mit ebenen- und volumenbasierten Werkzeugen war hierfür die Definition eines Gesten-Sets für die Realisierung der verschiedenen Teilinteraktionen (z.B. Erstellen, Verschieben, Filtern) erforderlich. Dies fundamentierte insbesondere aus der Prämisse, die bei der Entwicklung der Konzepte getroffen wurde, dass auf zusätzliche Menü-Elemente bei der Analyse von 3D-InfoVis verzichtet werden soll. Allerdings stellt die Integration komplexer Interaktionen in ein konsistentes und erwartungskonformes Gesten-Set eine Herausforderung dar, um Konflikte wie Mehrdeutigkeiten oder schwierige Memorierbarkeit einer Geste zu vermeiden.

Die Komplexität des Gesten-Sets kann prinzipiell durch Verwendung von zusätzlichen UI-Elementen reduziert werden. Dies kann beispielsweise durch die Einführung von Radialmenüs erfolgen, mittels derer die Werkzeuge, ohne Anwendung komplexer Gesten, erstellt und konfiguriert werden können. Hierdurch muss der Nutzer weniger Gesten memorieren und es besteht geringeres Fehlerpotenzial aufgrund der visualisierten Optionen. Darüber hinaus könnte auch das Einbeziehen alternativer Eingabeformen, wie: Blick-, Sprach- oder Freihandgesten-Steuerung, die Komplexität des aktuell vorhandenen Multi-Touch-Gesten-Sets reduzieren. Insgesamt ist eine balancierter Tradeoff, zwischen komplexen Gesten und der Verwendung von UI-Elementen, als ein geeigneter Leitfaden zu erachten.

6.5 Analyse von 3D-Informationsvisualisierungen

Die in Kapitel 4 entwickelten Konzepte, sowie die in Kapitel 5 erläuterte prototypische Implementierung ausgewählter Features zielen auf einen in Teilschritte gegliederten Analyse-Prozess ab. Hierbei werden die einzelnen Teilschritte mittels einer strukturellen Verkettung mehrerer Informationsvisualisierungen abgebildet. Dieser Ansatz wird darauf fundamentierte, dass die Analyse eines Datensatzes ebenfalls in verschiedene Unterbetrachtungen gegliedert ist.

Das Kernziels des Nutzers ist es durch die Analyse der Daten neue Informationen zu gewinnen, um beispielsweise eine übergeordnete Fragestellung beantworten zu können. Der Nutzer ist mit den definierten Konzepten in der Lage nach numerischen, temporalen, geographischen und kategorischen Wertebereiche zu filtern, die Entwicklung zeitbasierter Daten zu untersuchen, sich bestimmte Kennzahlen berechnen zu lassen und Datenobjekte zu Clustern. Mit diesen analytischen Operationen ist eine grundlegende Basis für die Untersuchung eines Datensatzes geschaffen.

Im Kontext der in dieser Thesis entwickelten Konzepte beschränkt sich allerdings das konkrete Resultat der Analyse verketteter Informationsvisualisierungen lediglich auf eine Submenge an Datenobjekten. Darüber hinaus wären allerdings zusätzliche Möglichkeiten zur Auswertung der Ergebnisse wünschenswert. Diese könnten zum einen das Abspeichern der Resultate in einem klassischen zusammenfassenden Report oder gar in Hinblick auf Kollaboration die Präsentation in einer immersiven AR-/VR-Umgebung beinhalten. Letztere Option stellt ein großes Potenzial hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit der durchgeführten Analyse für außenstehende Personen dar, da die einzelnen Teilschritte direkt in Informationsvisualisierungen greifbar gemacht werden können. Darüber hinaus könnte zusätzlich die Betrachtung komplexerer Analyse, z.B. in Form von mathematischer Statistik oder Machine-Learning angestrebt werden, da die Interaktionskonzepte und Werkzeuge voraussichtlich den notwendigen Freiraum für solche Mechanismen bieten.

6.6 Fokus auf dreidimensionale Visualisierungen als AR-Hologramme

Die AR-Hologramme im Kontext der entwickelten Konzepte und umgesetzten prototypischen Implementierung repräsentieren ausschließlich dreidimensionale InfoVis. Während diese im Kontext einer immersiven AR-Applikation ohne die Limitierungen wahrnehmbar sind, die bei Darstellung auf konventionellen Ausgabemedien bestehen, könnte das Verständnis über den repräsentierten Datensatz durch Hinzunahme von zweidimensionalen Informationsvisualisierungen zusätzlich gefördert werden. Hierdurch könnten im AR-Darstellungsraum alternative Einblicke beispielsweise in Form von: Häufigkeitsverteilungen, Netzdiagrammen oder Parallelen Koordinaten Darstellungen geboten werden. Bach et al. resümieren in ihrer Veröffentlichung in einem analogen Kontext, dass die Verknüpfung verschiedener Visualisierungsumgebungen anstatt der Ersetzung einer Visualisierungsumgebung durch eine andere angestrebt werden sollte [Bac+17b]. Daher können hybride Visualisierungsumgebungen, die zweidimensionale und dreidimensionale Informationsvisualisierung kombinieren, potenziell einen höheren Mehrwert bieten, als Umgebungen, die lediglich dreidimensionale InfoVis bereitstellen.

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Thesis wurde untersucht, wie die Analyse von 3D-InfoVis durch die Kombination interaktiver Oberflächen mit Augmented Reality Head-Mounted Displays (AR-HMDs) unterstützt werden kann. Hierfür wurden zunächst verwandte Arbeiten der themennahen Domänen: Mixed-, Augmented- und Virtual-Reality, Unterstützung analytischer Prozesse und Interaktion mit 3D-InfoVis erfasst. Hierbei wurde identifiziert, dass das Themengebiet der *Immersive Analytics*, welches Grundkonzepte der *Visual Analytics* in den Kontext moderner Interaktions- und Ausgabemedien rückt, vielseitige Szenarien und Anwendungskontexte aufspannt. Bei der Untersuchung zahlreicher Beispiel-Applikationen, die die Interaktion mit InfoVis in immersiven AR- und VR-Umgebungen betrachten, konnte identifiziert werden, dass die primären Eingabemodalitäten: Blick-, Sprach- oder Freihandgesten-Steuerung darstellen. Die Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs wurde lediglich von Reipschläger's und Dachelt's „Augmented Displays“-Konzept (unpubliziert) oder Butscher et al.'s „ART“-System umgesetzt [Rei18] [But+18]. Hierbei konnten initial die Vorzüge einer solchen Systemkonstellation aufgezeigt werden, die sich insbesondere in der Möglichkeit zur direkten Manipulation, sowie der nahtlosen Erweiterung und Bereicherung, der auf der interaktiven Oberfläche repräsentierten Inhalte fundamentieren.

Anschließend wurden Interaktionskonzepte und Analysewerkzeuge zur Unterstützung analytischer Prozesse im Umgang mit 3D-InfoVis, bei Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs entwickelt. Die resultierenden Konzepte adressieren in ihrem Kern Limitationen, die bei Darstellung und Interaktion von und mit 3D-InfoVis in konventionellen Systemen bestehen und im Rahmen der zuvor erläuterten Systemkonstellation gelöst oder wesentlich angereichert werden können. Um komplexe Abläufe von Interaktionen und damit konkrete Analyse-Prozesse zu unterstützen, sollen die dabei entwickelten Konzepte und Interaktionstechniken möglichst flexibel und kombinierbar sein. Hierfür wurden zunächst die drei Aufgabenkategorien: *Konfiguration*, *Verwaltung* und *analytische Untersuchung* unterschieden. Im Anschluss wurde die Klassifikation von Datendimensionen in: *textuelle*, *numerische*, *kategorische*, *temporale*, *geographische* und *relationale* Rollen vorgenommen, sowie Interaktionsabläufe und Benutzerschnittstellen spezifiziert. Zur Bereitstellung grundlegender Interaktionstechniken zur Analyse von 3D-InfoVis wurden: das *Verketten von Informationsvisualisierungen*, die *Repräsentation der Selektionsmengen*, die *Rotation von Informationsvisualisierungen*, die *Auslagerung von UI-Elementen in den AR-Darstellungsraum*, *Miniaturansichten erstellter Informationsvisualisierungen*, sowie der *nahtlose Wechsel zwischen Visualisierungen* konzipiert. In Hinblick auf Werkzeuge zur Unterstützung analytischer Prozesse im Umgang mit 3D-InfoVis wurde eine Differenzierung in *Werkzeuge ohne räumlichen Bezug* und *Werkzeuge mit räumlichen Bezug* zu den Datenobjekten einer Informationsvisuali-

sierung vorgenommen. Um Prozesse explorativer Datenanalyse zu adressieren wurde bei der Konzeption der Werkzeuge eine generische Grundstruktur gewählt. Abschließend wurden die drei Klassen generischer Werkzeuge: (*interaktive Häufigkeitsverteilungen*, *ebenenbasiert* und *volumenbasiert*) erörtert, welche ein Grundrepertoire an analytischen Interaktionen umsetzen.

Nachfolgend wurden ausgewählte Teilkonzepte in einer prototypischen Implementierung realisiert. Hierbei wurden für die interaktive Oberfläche und das AR-HMD jeweils eine *Unity-Engine-Applikation* entwickelt, welche über einen Server miteinander kommunizieren. Das Testen des Prototyps gab dabei aufschlussreiche Erkenntnisse über die Funktionsweise und das Zusammenwirken der Teilkonzepte, die in einer anschließenden Diskussion kritisch ausgewertet wurden.

Insgesamt konnte in dieser Thesis der Ansatz der Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs im Anwendungskontext der Analyse dreidimensionaler Informationsvisualisierungen angewandt werden. Die Erweiterung, der auf der interaktiven Oberfläche dargestellten Inhalte durch AR-Hologramme, in Verbindung mit direkter Multi-Touch-Interaktion, gewährt dabei eine Symbiose der Vorteile beider Systeme, indem präzise Eingabe und immersive Exploration von 3D-InfoVis ermöglicht wird. Im Verlaufe der Konzeption und Umsetzung der prototypischen Implementierung wurde deutlich, dass solch eine Systemkonstellation neuartige Visualisierungs- und Interaktionskonzepte benötigt. Daher existieren zahlreiche vielversprechende Ansatzpunkte für zukünftige Forschungen, welche im Folgenden Abschnitt präsentiert werden.

7.2 Fragestellungen für zukünftige Untersuchungen

In Anbetracht zukünftiger Forschungen bietet das zugrundeliegende Themenfeld das Potenzial einen Mehrwert durch Untersuchung verschiedener Fragestellungen zu generieren.

Evaluation des Prototypen

Im Kontext der hier betrachteten Analyse von 3D-InfoVis, bei Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs, könnte zunächst eine explorative Evaluation unter Anwendung der prototypischen Implementierung erfolgen. Im Rahmen einer solchen Studie könnten die Anwender beispielsweise die Aufgabe erhalten, einen zugrundeliegenden Datensatz auf bestimmte analytische Fragestellungen mit den verfügbaren Analyse-Werkzeugen zu untersuchen. Beobachtungen und Befragungen der Nutzer können aufschlussreiche Erkenntnisse über Intuitivität und Verständlichkeit der einzelnen Teilkonzepte bieten und somit zur Verbesserung dieser beitragen. Darüber hinaus kann potenziell wertvolles Wissen und Erkenntnisse über die Erwartungen der Nutzer in einem solchen Kontext gewonnen und hierdurch beispielsweise neue Werkzeuge und Funktionalitäten motiviert werden.

Kollaboration und Personalisierbarkeit

Der Aspekt der Kollaboration im Kontext der Kombination interaktiver Oberflächen mit AR-HMDs ist ebenfalls ein aussichtsreicher Ansatzpunkt für zukünftige Forschungen. Es wäre zu untersuchen, inwiefern effektive Zusammenarbeit in einem Co-Located-Szenario (Nutzer kollaborieren in einer physischen Umgebung) oder einem Distributed-Szenario (Nutzer kollaborieren in einer digitalen Umgebung) möglich ist. Dabei kann beispielsweise erforscht werden, was eine Kollaboration in dieser Systemkonstellation charakterisiert und welche möglichen Konflikte bei einer Zusammenarbeit entstehen können. Dies beinhaltet neben kollaborativer Datenanalyse beispielsweise auch den Aspekt der Präsentation der Analyse-Ergebnisse in einer kollaborativen Umgebung. Hierbei kann auf existierenden Forschungen, wie z.B. von Isenberg et al. aufgebaut werden, die eine Studie zur Kollaboration zweier Nutzer in einem Co-Located-Szenario an einem Tabletop im Kontext der visuellen Datenanalyse durchführten [Ise+12].

Zusätzlich bieten AR-HMDs das große Potenzial für jeden Nutzer eine personalisierte Sicht bereitstellen zu können. So könnte jeder Anwender entsprechend seiner Interessen unterschiedlich aufbereitete Inhalte repräsentiert bekommen. Gegenstand zukünftiger Forschungen könnte es daher sein zu identifizieren, welche Möglichkeiten der Personalisierbarkeit für einen Anwender in diesem Kontext wünschenswert sind. Diese könnten beispielsweise die: Repositionierung/Skalierung einzelner AR-Hologramme, die Repräsentation in alternativen Darstellungsformen oder das Mitführen eigener Werkzeuge zur Interaktion mit den AR-Hologrammen beinhalten. Darüber hinaus könnten solche Personalisierungs-Konzepte durch Anwendung von Metaphern greifbar gemacht werden. Ein Beispiel für eine solche Metapher könnte ein augmentierter Schreibtisch sein, auf dem der Nutzer Inhalte beliebig positionieren, skalieren, ablagern, sowie verschiedene Werkzeuge in Strukturen wie virtuellen Schubladen auffinden können.

Weiterentwicklung der Konzepte durch Kontexterweiterung

Im Fokus der prototypischen Implementierung konnten die in Kapitel 4 entwickelten Konzepte initial an den InfoVis-Techniken: Balken- und Streudiagramm getestet werden. Hierdurch können: das Filtern von Datenobjekten, der Vergleich zeitbasierter Daten, die Berechnung von Kennzahlen oder das Clustern von Datenobjekten realisiert werden. Zukünftige Untersuchungen könnten darüber hinaus die Anwendbarkeit der Konzepte auf weitere InfoVis-Techniken, wie Graphen, Parallele Koordinaten, Netzdiagramme, Flächenfüllende Verschachtelungen oder Geschichtete Ansätze untersuchen. Voraussichtlich kann die Betrachtung zusätzlicher InfoVis-Techniken die konzeptionelle Weiterentwicklung der in Kapitel 4.5 definierten generischen Werkzeuge fördern und z.B. neue Kategorien dieser eröffnen. Hierbei könnten auch Funktionalitäten, wie: das Erzeugen von Freihand-Annotationen, die Anwendung von Machine-Learning oder mathematischer Statistik angewandt werden. Darüber hinaus könnte die Anwendung der Konzepte auf themennahe Domänen, wie z.B.: SciVis, Business Intelligence, Data-Discovery oder 3D-Modellierung untersucht werden.

Symbiose statt Ersetzung

Schlussendlich ist folgende grundlegende Erkenntnis als Leitfaden zu behalten: die Kombination zweier Domänen, wie z.B. der einer interaktiven Oberfläche mit einem AR-HMD, sollte stets auf die Symbiose der Vorteile beider Domänen abzielen und nicht die Ersetzung eines Systems durch das Andere als Intention haben.

Literatur

- [Adi+10] C Adithya, K Kowsik, D Namrata et al. „Augmented reality approach for paper map visualization“. In: *Communication and Computational Intelligence (INCOC-CI), 2010 International Conference on* (2010), S. 352–356 (zitiert auf Seite 34).
- [Ama+05] Robert Amar, James Eagan und John Stasko. „Low-level components of analytic activity in information visualization“. In: *Proceedings - IEEE Symposium on Information Visualization, INFO VIS* (2005), S. 111–117. arXiv: 15334406 (zitiert auf den Seiten 13, 29).
- [And+01] L.W. Anderson, D.R. Krathwohl und B.S. Bloom. *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: a revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. Longman, 2001 (zitiert auf Seite 13).
- [Bac+17a] Benjamin Bach, Ronell Sicat, Hanspeter Pfister und Aaron Quigley. „Drawing into the AR-Canvas: Designing Embedded Visualizations for Augmented Reality“. In: *Workshop on Immersive Analytics: Exploring Future Interaction and Visualization Technologies for Data Analytics* (2017) (zitiert auf Seite 17).
- [Bac+17b] Benjamin Bach, Ronell Sicat, Johanna Beyer, Maxime Cordeil und Hanspeter Pfister. „The Hologram in My Hand: How Effective is Interactive Exploration of 3D Visualizations in Immersive Tangible Augmented Reality?“ In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* (2017) (zitiert auf den Seiten 10, 17, 21, 70).
- [Bad+17] Sriram Karthik Badam, Arjun Srinivasan und John Stasko. „Affordances of Input Modalities for Visual Data Exploration in Immersive Environments“. In: (2017), S. 1–5 (zitiert auf Seite 14).
- [BC17] Todd V Billow und Joseph A Cottam. „Exploring the Use of Heuristics for Evaluation of an Immersive Analytic System“. In: (2017) (zitiert auf Seite 9).
- [Blo56] B.S. Bloom. *Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals*. Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals Bd. 1. D. McKay, 1956 (zitiert auf Seite 13).
- [Bra99] RK Brath. „Effective information visualization, guidelines and metrics for 3D interactive representations of business data“. In: May (1999) (zitiert auf den Seiten 19, 34).
- [But+18] Simon Butscher, Sebastian Hubenschmid, Jens Müller, Johannes Fuchs und Harald Reiterer. „Clusters, Trends, and Outliers: How Immersive Technologies Can Facilitate the Collaborative Analysis of Multidimensional Data“. In: (2018) (zitiert auf den Seiten 11, 32, 40, 71).

- [Car+07] R M Casseb do Carmo, B S Meiguins, A S G Meiguins et al. „Coordinated and Multiple Views in Augmented Reality Environment“. In: *Information Visualization, 2007. IV '07. 11th International Conference* (2007), S. 156–162 (zitiert auf den Seiten 18, 19).
- [CB17] Carlos Carbonell Carrera und Luis Alberto Bermejo Asensio. „Augmented reality as a digital teaching environment to develop spatial thinking“. In: *Cartography and Geographic Information Science* 44.3 (2017), S. 259–270 (zitiert auf Seite 34).
- [Cha+15] Tom Chandler, Maxime Cordeil, Tobias Czauderna et al. „Immersive Analytics“. In: *2015 Big Data Visual Analytics, BDVA 2015* September 2016 (2015) (zitiert auf den Seiten 8, 19, 21, 69).
- [Che+17] Zhutian Chen, Huamin Qu und Yingcai Wu. „Immersive Urban Analytics through Exploded Views“. In: (2017) (zitiert auf Seite 15).
- [CK] IKEA Deutschland GmbH und Co. KG. *IKEA Place*. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf Seite 5).
- [Cli+17] Grégoire Cliquet, Matthieu Perreira, Fabien Picarougne, Yannick Prié und Toïnon Vigier. „Towards HMD-based Immersive Analytics“. In: (2017) (zitiert auf Seite 8).
- [CN+92] Carolina Cruz-Neira, Daniel J. Sandin, Thomas A. DeFanti, Robert V. Kenyon und John C. Hart. „The CAVE: audio visual experience automatic virtual environment“. In: *Communications of the ACM* 35.6 (1992), S. 64–72. arXiv: arXiv:1011.1669v3 (zitiert auf Seite 6).
- [Com] Open Source Community. *OpenRefine*. <http://openrefine.org/>. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf Seite 54).
- [Cora] Microsoft Corporation. *HoloLens*. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf den Seiten 2, 3, 5, 6, 8, 53).
- [Corb] Microsoft Corporation. *Samsung SUR40 mit Microsoft PixelSense*. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf Seite 53).
- [Corc] Microsoft Corporation. *Unity Engine*. <https://github.com/Microsoft/MixedRealityToolkit-Unity>. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf den Seiten 54, 63).
- [Cow+96] D J Cowperthwaite, M Sheelagh, T Carpendale und F D Fracchia. „Visual Access for 3{D} Data“. In: *Proc.of ACM CHI 96 Conference on Human Factors in Computing Systems* 2 (1996), S. 175–176 (zitiert auf Seite 18).
- [CS96] T. Carpendale und M. Sheelagh. „Case study: Visual access for landscape event based temporal data“. In: *Visualization'96. ...* (1996), S. 425–428, (zitiert auf Seite 18).
- [Die06] Joachim Diepstraten. „Interactive Visualization Methods for Mobile Device Applications“. In: *Policy* (2006) (zitiert auf Seite 16).
- [Don+14] Ciro Donalek, S. G. Djorgovski, Alex Cioc et al. „Immersive and Collaborative Data Visualization Using Virtual Reality Platforms“. In: *2014 IEEE International Conference on Big Data Immersive* (2014), S. 609–614. arXiv: 1410.7670 (zitiert auf Seite 9).

- [ElS+16] Neven A M ElSayed, Bruce H. Thomas, Kim Marriott, Julia Piantadosi und Ross T. Smith. „Situating Analytics: Demonstrating immersive analytical tools with Augmented Reality“. In: *Journal of Visual Languages and Computing* 36 (2016), S. 13–23 (zitiert auf Seite 10).
- [Feb+13] Alessandro Febretti, Arthur Nishimoto, Terrance Thigpen et al. „CAVE2: a hybrid reality environment for immersive simulation and information analysis“. In: March (2013), S. 864903 (zitiert auf Seite 8).
- [Fek+08] Jean-daniel Fekete, Jarke J Van Wijk, John T Stasko und Chris North. „The Value of Information Visualization“. In: *Information Visualization* 4950.2 (2008), S. 1–18 (zitiert auf Seite 1).
- [Fil+17] Jorge A Wagner Filho, Marina F Rey, Carla M D S Freitas und Luciana Nedel. „Immersive Analytics of Dimensionally-Reduced Data Scatterplots“. In: (2017) (zitiert auf Seite 9).
- [Fou] Blender Foundation. *Blender*. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf den Seiten 15, 17, 19).
- [He+17] Lindun He, Alejandro Guayaquil-sosa und Tim McGraw. „Medical Image Atlas Interaction in Virtual Reality“. In: (2017) (zitiert auf Seite 15).
- [Her+17] Dominik Herr, Jan Reinhardt, Robert Krüger, Guido Reina und Thomas Ertl. „Immersive Visual Analytics for Modular Factory Layout Planning“. In: (2017) (zitiert auf Seite 10).
- [Inc] Google Inc. *Tilt Brush by Google*. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf Seite 5).
- [Ise+12] Petra Isenberg, Danyel Fisher, Sharoda A. Paul et al. „Co-located collaborative visual analytics around a tabletop display“. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 18.5 (2012), S. 689–702 (zitiert auf Seite 73).
- [Jos] Seb Joseph. *How Ikea is using augmented reality*. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf Seite 5).
- [Kan] Microsoft HoloLens Youtube Kanal. *Microsoft HoloLens: Mixed Reality in the Modern Workplace*. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf Seite 5).
- [Kei+08] Daniel Keim, Gennady Andrienko, Jean-daniel Fekete et al. „Visual Analytics : Definition , Process and Challenges To cite this version : Visual Analytics : Definition , Process , and Challenges“. In: *Information Visualization - Human-Centered Issues and Perspectives* (2008), S. 154–175 (zitiert auf den Seiten 6, 7).
- [Kim+17] Taeheon Kim, Bahador Saket, Alex Endert und Blair MacIntyre. „VisAR: Bringing Interactivity to Static Data Visualizations through Augmented Reality“. In: (2017). arXiv: 1708.01377 (zitiert auf Seite 10).
- [Kjo] Kjomi. *Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum*. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf Seite 6).
- [Kwo+16] Oh Hyun Kwon, Chris Muelder, Kyungwon Lee und Kwan Liu Ma. „A study of layout, rendering, and interaction methods for immersive graph visualization“. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 22.7 (2016), S. 1802–1815 (zitiert auf den Seiten 9, 33).
- [Lan] Ben Lang. *Google Acquires ‘Tilt Brush’ Developer and Thrive Audio to Add to VR Team*. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf Seite 5).

- [LS07] Martin Luboschik und Heidrun Schumann. „Explode to explain - Illustrative information visualization“. In: *Proceedings of the International Conference on Information Visualisation* (2007), S. 301–307 (zitiert auf Seite 15).
- [LS08] M Luboschik und H Schumann. „Discovering the covered: Ghost-views in information visualization“. In: *16th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, WSCG'2008 - In Cooperation with EUROGRAPHICS, Full Papers Section 3* (2008), S. 113–118 (zitiert auf Seite 16).
- [Lu+17] Aidong Lu, Jian Huang, Shaoting Zhang, Chuang Wang und Weichao Wang. „Towards mobile immersive analysis: A study of applications“. In: *2016 Workshop on Immersive Analytics, IA 2016* (2017), S. 25–30 (zitiert auf Seite 8).
- [Mac88] Jock Mackinlay. „Applying a Theory of Graphical Presentation to the Graphic Design of User Interfaces“. In: *Proceedings of the 1st Annual ACM SIGGRAPH Symposium on User Interface Software*. UIST '88. Alberta, Canada: ACM, 1988, S. 179–189 (zitiert auf Seite 29).
- [Mil+95] Paul Milgram, Haruo Takemura, Akira Utsumi und Fumio Kishino. „<title>Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum</title>“. In: 2351 (1995), S. 282–292. arXiv: NIHMS150003 (zitiert auf Seite 6).
- [ML17] Elias Mahfoud und Aidong Lu. „Immersive Visualization for Abnormal Detection in Heterogeneous Data for On-site Decision Making“. In: (2017) (zitiert auf Seite 10).
- [OV] Inc. Oculus VR. *Oculus Rift*. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf Seite 6).
- [Pap16] Conference Paper. „3D InfoVis is Here to Stay“. In: February (2016) (zitiert auf Seite 2).
- [PD10] Bernhard Preim und Raimund Dachzelt. *Interaktive Systeme*. 2010. arXiv: arXiv:1011.1669v3 (zitiert auf den Seiten 6, 16).
- [Pro] Marshall Project. *Crime in Context, 1975-2015*. Zugriff: 2018-04-16 (zitiert auf Seite 54).
- [Qia] Long Qian. *HoloLensARToolKit*. <https://github.com/qian256/HoloLensARToolKit>. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf den Seiten 54, 63).
- [Raj+04] Dheva Raja, Doug A Bowman, John Lucas und Chris North. „Exploring the Benefits of Immersion in Abstract Information Visualization“. In: *Proceedings of the 8th Immersive Projection Technology Workshop* (2004), S. 61–69 (zitiert auf Seite 2).
- [Rea+17] Matthew Ready, Tim Dwyer und Jason H Haga. „Immersive Visualisation of Big Data for River Disaster Management“. In: (2017), S. 3–6 (zitiert auf Seite 34).
- [Rei18] Dachzelt Reipschläger. „Augmented Displays : Using Augmented Reality to Extend Interactive Surfaces“. In: (2018) (zitiert auf den Seiten 1, 3, 10, 16, 21–23, 25, 55, 67, 71).
- [Rit+17] Panagiotis D Ritsos, Joseph W Mearman, James R Jackson und Jonathan C Roberts. „Synthetic Visualizations in Web-based Mixed Reality“. In: i (2017) (zitiert auf Seite 10).

- [Ros+11] René Rosenbaum, Jeremy Bottleson, Zhuiguang Liu und Bernd Hamann. „Involve Me and I Will Understand!—Abstract Data Visualization in Immersive Environments“. In: *Advances in Visual ...* (2011), S. 530–540 (zitiert auf Seite 8).
- [Ros16] Philipp Roscher. „Verwendung von Ebenen-Werkzeugen zur Interaktion mit räumlicher 3D-Informationsvisualisierung“. In: (2016) (zitiert auf den Seiten 16, 45).
- [Sae+17] Michael Saenz, Ali Baigelenov, Ya-Hsin Hung und Paul Parsons. „Reexamining the cognitive utility of 3D visualizations using augmented reality holograms“. In: *Workshop on Immersive Analytics: Exploring Future Interaction and Visualization Technologies for Data Analytics (Immersive 2017)* (2017) (zitiert auf Seite 13).
- [Sch+07] Markus Schedl, Peter Knees, Gerhard Widmer, Klaus Seyerlehner und Tim Pohle. „Browsing the Web Using Stacked Three-Dimensional Sunbursts to Visualize Term Co-Occurrences and Multimedia Content“. In: *InfoVis'07: Poster Compendium of the IEEE Conference on Information Visualization 1* (2007), S. 2–3 (zitiert auf Seite 33).
- [Sch08] Maximilian Scherr. „Multiple and Coordinated Views in Information Visualization“. In: *Trends in Information Visualization* (2008), S. 38 (zitiert auf Seite 19).
- [Shn96] B. Shneiderman. „The eyes have it: a task by data type taxonomy for information visualizations“. In: *Proceedings 1996 IEEE Symposium on Visual Languages* (1996), S. 336–343 (zitiert auf den Seiten 13, 26).
- [Sof] Tableau Software. *Tableau*. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf Seite 1).
- [TC05] James J. Thomas und Kristin A. Cook. „Illuminating the path: The research and development agenda for visual analytics“. In: *IEEE Computer Society* (2005), S. 184. arXiv: arXiv:1011.1669v3 (zitiert auf Seite 7).
- [Tom+17] C. Tominski, S. Gladisch, U. Kister, R. Dachsel und H. Schumann. „Interactive Lenses for Visualization: An Extended Survey“. In: *Computer Graphics Forum* 36.6 (2017), S. 173–200 (zitiert auf Seite 17).
- [Tor+06] M. Tory, A. E. Kirkpatrick, M. S. Atkins und T. Moller. „Visualization task performance with 2D, 3D, and combination displays“. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 12.1 (2006), S. 2–13 (zitiert auf den Seiten 2, 3).
- [Tra+13] Matthias Trapp, Sebastian Schmechel und Jürgen Döllner. „Interactive rendering of complex 3D-Treemaps with a comparative performance evaluation“. In: *GRAPP 2013 IVAPP 2013 - Proceedings of the International Conference on Computer Graphics Theory and Applications and International Conference on Information Visualization Theory and Applications* January (2013), S. 165–175 (zitiert auf Seite 33).
- [Uni] *Unity Engine*. <https://unity3d.com/de>. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf den Seiten 3, 54).
- [VI] Ciro Donalek George Djorgovski Scott Davidoff Marco DeMiroz Virtualics Inc. Michael Amori. *Virtualics*. Zugriff: 2018-04-02 (zitiert auf den Seiten 9, 18, 19).

- [Yi+07] Ji Soo Yi Ji Soo Yi, Youn Ah Kang Youn Ah Kang, J.T. Stasko und J.a. Jacko. „Toward a Deeper Understanding of the Role of Interaction in Information Visualization“. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13.6 (2007), S. 1224–1231 (zitiert auf Seite 14).
- [YM98] P Young und M C1 858218 Munro. „Visualizing Software in Virtual Reality“. In: *Proceedings of the 6th International Workshop on Program Comprehension* (1998), S. 19 (zitiert auf Seite 9).
- [Zha+16] Meng-Jia Zhang, Jie Li und Kang Zhang. „An immersive approach to the visual exploration of geospatial network datasets“. In: *Proceedings of the 15th ACM SIG-GRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry - VRCAI '16* (2016), S. 381–390 (zitiert auf den Seiten 9, 33).
- [Car97] M S T Carpendale Cowperthwaite, D. J., and F. D. Fracchia. „Extending Distortion Viewing Techniques from 2D to 3D Data“. In: *IEEE Computer Graphics and Applications, Special Issue on Information Visualization* 17.August (1997), S. 42–51 (zitiert auf Seite 18).
- [Kei+10] Kohlhammer Jörn Keim Daniel, Georey Ellis Mansmann und Florian. *Mastering the Information Age Solving Problems with Visual Analytics*. 2010, S. 57 –86. arXiv: arXiv:1011.1669v3 (zitiert auf Seite 7).

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Master-Thesis selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Dresden, April 23, 2018

Maximilian Gräf

